

# 地理信息系统及其在动物空间行为研究中的应用

刘 强<sup>1,2</sup>, 杨晓君<sup>1</sup>, 朱建国<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院昆明动物研究所, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 空间属性是动物行为的重要特征, 也是行为生态学研究必须面对的难题之一。地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 具有强大的空间分析功能, 它在动物行为生态学研究得到了越来越广泛的应用, 如生境选择、领域分析、迁徙路线、活动节律等。本文较系统地阐述了 GIS 的原理以及在行为生态学研究中所涉及的基本概念和原理, 对近年来利用 GIS 进行的行为生态学研究做了回顾和总结, 并对其未来的发展进行了展望。

**关键词:** 地理信息系统 (GIS); 空间行为; 空间分析; 卫星跟踪

中图分类号: Q958.11 文献标识码: A 文章编号: 0254–5853 (2007) 01–0106–07

## Geographic Information System and Their Application in the Study of Animal Spatial Behavior

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-jun<sup>1</sup>, ZHU Jian-guo<sup>1,\*</sup>

(1. Kunming Institute of Zoology, the Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650223, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Spatial attributes are an important characteristic of animal behavior. They are also a difficult subject for researchers, as the study methods, techniques and equipment required to study them have been limited in past years. With the rapid development of their technique and function in the last twenty years, Geographic Information Systems (GIS) have been more often applied in the study of animal behavioral ecology, such as habitat selection, territory, migration route and so on. GIS is a computer-based system, capable of capturing, storing, analyzing, and displaying geographically referenced data with its powerful spatial analysis abilities. In this paper, we discuss the principles and concepts of GIS in studies of animal behavioral ecology. Approaches and development of recent animal behavioral ecology studies using GIS are also summarized.

**Key words:** Geographic information systems (GIS); Spatial behavior; Spatial analysis; Satellite tracking

在任一选定的时刻或时间段, 动物个体或群体均在其所处环境中有一个唯一对应的空间位置。这个位置维持不变或随时间推移而不断发生变化。这种属性与动物的行为紧密相连。较简单的, 如在地面奔跑、跳跃, 在空中飞行等; 较高级的, 如占区、迁徙等。另外, 动物的静立也可以看作是一种比较特殊的空间行为。动物行为表达需要一定的空间, 若活动空间过小, 虽然不会对刚性行为 (如摄食行为、排遗行为、休息行为) 产生大的影响, 但

会限制一些弹性较大的行为 (如发情行为、社会行为、通讯行为、玩耍行为等) 的表达 (Jiang, 2004)。因而在行为学研究中, 若忽视了这种空间性, 往往不能全面理解动物行为的生物学意义。那么如何才能迅速而有效地发现和总结动物空间位点之间的关系和规律呢? 在以往的研究中, 人们往往利用纸质地图和尺子等工具进行距离、方位、面积等属性的量算, 但由于低效、误差大等原因, 能够进行的空间分析很有限。近几十年来, 随着计算机

\* 收稿日期: 2006–08–10; 接受日期: 2006–12–11

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KSCX2–1–09、KSCX2-SW-119); 国际鹤类基金会小额基金项目资助

\* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zhu@mail.kiz.ac.cn

科学和地理信息技术的蓬勃发展,地理信息系统(Geographic Information System, GIS)便应运而生。GIS是一种获取、存储、查询、分析、显示与应用地理信息的计算机系统,是分析和处理海量数据的通用技术,它在近30多年来取得了惊人的发展,并广泛应用于资源调查、环境评估、区域发展规划、公共设施管理、交通安全管理等领域(Chen et al, 2002)。

## 1 空间实体与 GIS 模型的对应关系

GIS并不能直接反映现实世界的空间要素,而是将其抽象成为点、线、面等简单的几何对象来表现。这3种类型的几何对象由维数和性质来区别:点对象的维数为零,它只代表一个空间位置;线对象是一维的,具有长度的特性;面对象是二维的,具有面积和边界的属性。其中点及其坐标是矢量数据模型的基本单元,一系列的点构成线,线则进一步构成面。例如,在云南省纳帕海自然保护区黑颈鹤的研究中,我们定义村庄、采石场、鹤的分布位置等为点对象;道路、河流、小溪、穿过保护区的高压线路等为线对象;某种栖息地类型的分布区域、鹤的活动区域、领域等为面对象。但是,某一空间实体在GIS中的表现并不总是唯一的,这还取决于所关注区域的尺度大小。比如对于一个500 hm<sup>2</sup>的县城来说,当我们研究2400 hm<sup>2</sup>大小的保护区域时,就将这个县城定义为一个面;而当我们研究云南省居民点的分布时,这个县城就只能定义为一个点了。另外,除了关注动物的空间位置之外,我们还要了解包括动物的行为类别、群体组成、所利用的栖息地类型等非空间性因子,只有把这些特征结合起来,才能够更好地理解动物行为的生物学意义。在地理信息系统软件中,除了有表示研究对象的空间特征(经纬度坐标、形状等)之外,还包括其属性信息(时间、行为类别、种群数量、家庭组成等)。通过这种数据结构,就可以把各种信息联系在一起,很方便地建立各种因子间的关系并进行分析。

在诸多的GIS软件中应用最为广泛的就是ESRI公司的ArcGIS(Arview或ArcGIS desktop)软件包。它在显示、查询、统计图表、地图设计等方面显示了强大的功能。ArcGIS通过自身的可扩展软件结构,为GIS应用提供了一个具有伸缩性的软件平台,使不同专业的使用人员可以开发出一系列针对

具体专业的“插件”式模块,利用这些模块进行组合可以显著地扩展ArcGIS的功能。Scripts(Avenue)就是ArcGIS提供的面向对象的程序设计、调试、开发工具。它自身带有编辑器、编译器、随机帮助和多种调试工具,独立于硬件平台和操作系统。目前应用于野生动物行为生态研究的插件已有许多,如美国地质调查局(USGS, 2003)开发的“Animal Movement”系列模块就是代表。

## 2 元空间数据的获取方法

点是空间对象的元组成结构,因而在行为学研究中,首先就要解决如何精确而有效地获得点数据的问题。除了以前较多使用的直接观察记录法之外,一些先进的定位方法正在被开发并应用于调查实践中,如无线电遥测、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等。

### 2.1 直接观察记录法

通过直接观察,在纸质地图上标注动物某时间的位置。这种方法直观明了,但受限制也较多。采用这种方法的先决条件是调查地视野开阔,没有障碍物阻挡视线;调查对象的活动空间不能太大,要确保观察者能跟踪观察调查对象;还受所用地图的限制,目前在研究中使用的地图精度往往是1:50000地形图,也就意味着图上1 cm即代表500 m的实际距离,对于活动范围较小的动物,往往就显无能为力(Zhao et al, 1995; Jiang, 2002)。

### 2.2 无线电遥测

无线电遥测或称无线电追踪是通过遥测安装在动物身上的发射器所发出的特定频率的无线电信号,用以确定动物所在位置的技术。自20世纪60年代末,无线电遥测技术用于野生动物研究以来,应用范围不断扩大,尤其是近10年来,随着科技的发展和高质量晶体管的出现,其适用性和灵敏度都有了显著提高。在应用这项技术时要注意以下几点:(1)可以捕到足够数量的动物个体,以确保适当的样本数,并且可以把发射器稳妥地固定到动物身体上;(2)安放发射器后,不能影响动物的正常行为,如求偶、逃生等;(3)最大跟踪距离,目前在空中为30 km,在地面为10 km,精度为100 m之内。

无线电遥测技术近年来取得了很大的发展。新型的装备具有以下特点:(1)种类多样,包括体内嵌入式、体外外挂式以及粘贴式等多种机型,可以

根据具体应用灵活选用；(2) 发射器内可以安装各种感应器探头，以便同时获得体温，或者环境温度、湿度变化等数据；(3) 固定发射器的项圈可以自动脱落，减少了捕捉动物的次数；(4) 在可控制性方面，装有电脑芯片的发射器可以随时调整状态，如是否发射信号、发射信号的间隔和长短等；(5) 接收机的天线多型化，以适应不同的环境，其尺寸和重量也大大减轻了，更便于携带；(6) 耐高温、低温等恶劣环境，可在  $-20^{\circ}\text{C}$  至  $40^{\circ}\text{C}$  下正常工作，且抗震动、防水性能更好 (Ma et al, 1999; ATS, 2006)。另外，随着发射器越来越小巧，可应用于更小型的动物且能减少对动物活动的影响，如美国 ATS 生产的用于跟踪小型鱼类的 F415，体积竟只有  $6\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，重量也只有  $0.5\text{ g}$ 。

无线电遥测技术在国内的应用已经普及，国内自 20 世纪 80 年代开始应用也越来越广泛。国内用此技术研究过的重要物种有大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) (Schaller, 1985)、黄腹角雉 (*Tragopan caboti*) (Sun & Zheng, 1992)、红腹角雉 (*Tragopan temminckii*) (Shi & Zheng, 1999)、白颈长尾雉 (*Syrmaticus eliot*) (Shi & Zheng, 1995; Peng & Ding, 2005)、朱鹮 (*Nipponia nippon*) (Ma et al, 2001)、达乌尔鼠兔 (*Ochotona dauurica*) (Wang et al, 2000)、秦岭羚牛 (*Budorcas taxicolor bedfordi*) (Song & Zeng, 2000, 2001)、红腹锦鸡 (*Chrysolophus pictus*) (Liang et al, 2003)、白冠长尾雉 (*Syrmaticus reevesii*) (Zhang et al, 2004) 等。

### 2.3 全球定位系统 (GPS)

利用人造卫星的全球定位系统 (GPS) 对候鸟迁徙线路进行研究始于 20 世纪 80 年代末期 (Seegar, 1996)。目前使用的 GPS 跟踪技术主要有以下两种。

**2.3.1 主动式 GPS 跟踪技术** 卫星跟踪系统主要由发射机、卫星上的传感器、地面接收站三部分组成，其原理是将发射机固定在研究对象身上 (重量应控制在研究对象体重的 4% 以下)，发射机按照用户设定的时间间隔发射信号，当卫星经过研究对象上空时，传感器接受发射机传来的信号，然后将信号传送到地面接收站，经计算机处理得到跟踪对象所处的经纬度、高度、温度等信息，最后将这些信息通过网络传送给用户 (Guan, 2000)。国外已经较多地用此项技术来确定迁徙鸟类的迁徙路线、重要停歇地，并进一步评价该物种的保护状况等

(图 1)。除了迁徙鸟类外，此项技术还用于陆生哺乳类，如非洲象 (*Elephas africanus*) (Lindeque et al, 1991)，甚至一些海生哺乳类，如港海豹 (*Phoca vitulina*) (Jakob et al, 2003) 的研究。我国的首次应用是中国科学院新疆生态与地理研究所与阿联酋合作进行的波斑鸨 (*Chlamydotis macqueen*) 研究。此项目经过 10 余年的深入研究，已查清波斑鸨的分布范围、迁徙路线、繁殖地及越冬地 (Yang et al, 2005)。Wu et al (2006) 于 2003 年应用此项技术在云南老君山对滇金丝猴 (*Rhinopithecus bieti*) 进行了家域的研究。中国科学院昆明动物研究所、中国鸟类环志中心、国际鹤类基金会于 2005



图 1 1995 年应用卫星跟踪方法得到的白鹤迁徙路线图 (Kanai et al, 2002)

Fig. 1 The migration routes of white crane (*Grus leucogeranus*) in 1995 using satellite tracking technology (Kanai et al, 2002)

年开始联合进行“卫星跟踪黑颈鹤 (*Grus nigricollis*) 迁徙”项目的研究, 现已确定了云南省昭通大山包自然保护区与四川省若尔盖湿地之间的迁徙路线以及途中的重要停歇点 (Yang et al, 2005)。

虽然主动式卫星跟踪技术代表了目前定位技术的最高水平, 但仍有它的受限之处: (1) 跟踪对象的活动环境应比较开阔, 不能有浓密树冠或高大狭窄山体的遮挡, 以确保与卫星的通讯; 比较适合应用此技术的物种包括水禽、猛禽以及在草原上活动的大型兽类, 如黑颈鹤、白尾海雕、藏羚羊等。(2) Argos 系统 (定位所用的卫星系统) 将定位精度分成了 7 级, 即 3、2、1、0、A、B、Z, 其精度依次降低, 其中 3 级精度小于 150 m; 2 级精度介于 150—350 m 之间; 1 级精度介于 350—1 000 m 之间; 0 级精度大于 1 000 m; 由于 A、B、Z 级误差太大, 因此在动物研究当中很少使用。在获得的位点当中, 精度优于 150 m 的 3 级精度的仅有 68% 的获得率 (Vincent, 2002)。(3) 设备性能不稳定, 装置失效的概率较高。(4) 装置中的电池寿命有限和 不 稳 定。

**2.3.2 被动式 GPS 跟踪技术** 被动式与主动式 GPS 技术的最大区别是无需占用卫星通信频道, 其原理与平时使用的手持式 GPS 相同, 只不过体积和重量都大大缩小。被动式 GPS 跟踪技术工作原理为: 跟踪器按照初始设置, 每隔一定的时间自动获取位置信息后储存在跟踪器的芯片内, 在跟踪器回收之后再读取跟踪对象在不同时间的位置信息。由于不直接调用卫星资源, 此项技术的应用可以大大降低 成本; 同时, 其定位精度甚至可以达到 10 m 以下, 优于主动式 GPS 定位系统。此项技术应用于信鸽赛事中, 获得了非常精确的信鸽飞行路线 (Lipp, 2004) 结果。但此项技术的最大缺点就在于必须回收跟踪器, 这也极大地制约了其在野生动物研究中的应用。

### 3 空间数据分析及应用

在获得动物的空间分布数据之后, 便可以将其导入地理信息系统, 以电子地图的形式直观显示, 只要与对应的行政图或植被图进行简单的视觉叠加, 便可以解决动物“在哪里”的问题, 以此来探明其活动路线、夜栖地等。但行为学家关心的并不仅仅于此, 而是这些点之间所蕴含的深层含义。动物在自然界中受各种环境因子的影响继而产生不同

的行为表达。因此, 要探明行为的表达机理必须将各种因子联系起来进行分析, 以得出正确的结论。地理信息系统一方面继承了普通信息管理系统的功能; 另一方面又开发出了具有独特的空间分析能力的功能, 从而使它在行为学研究中得到了越来越广的应用。

#### 3.1 基本应用

**3.1.1 距离量测** 距离量测涉及点与点之间、点与其对应的最近点或线之间的直线距离的量算。它用于测算动物的活动 (或移动) 路线、活动点到公路的最短距离等。对得出的数据可以进一步进行统计分析。例如, 在对美国阿拉斯加州西南部分布的黑尾鹿 (*Odocoileus hemionus*) 进行栖息地选择研究中, 距离量测验证了鹿的活动并非呈随机分布, 而是靠近原始林与皆伐区的边缘 (Chang et al, 1995)。

**3.1.2 面积量测** 点按照一定的运算规则或数学模型连接便构成多边形 (polygon), 多边形具有面的属性, 可以直接得到面积。家域 (home range) 和领域 (territory) 是野生动物行为学研究中的重要内容, 应用面积量测便可由动物的活动位点得到其家域、领域的形状和面积, 动物进行正常活动 (觅食、配偶、育幼等) 的区域称为家域, 但偶尔的非正常活动, 比如为探测周围环境而到过的区域不包括在家域范围之内 (Burt, 1943)。领域则包含在家域之内, 指持有者独自占有或优先使用的区域; 领域可以是家域的全部或其中一部分, 领域持有者往往使用气味、声音或爪印等来表明自己的领主地位 (Smith, 1968; Kruuk, 1972, 1989; Peters & Mech, 1975; Price, 1990)。每种动物都具有一个稳定或变化的活动区, 而只有那些在其生命进程的某一阶段通过防御或进攻来保护的部分, 才算是领域 (Shi, 1996)。应用于 Arcview GIS 的“Animal Movement”插件提供了 6 种针对动物活动区 (home range) 的计算模型, 其中最常用的为最小凸多边形法 (minimum convex polygon, MCP) 以及内核法 (kernel)。最小凸多边形法是应用较早也是较为简便的一种区域计算方法, 原理是顺次连接最外围的点, 但必须保证所有的内角均小于 180°, 其计算结果具有很好的可比性 (Harris, 1990; Elise, 1997), 并可以做进一步的活动区域叠加分析 (图 2)。内核法运用高斯四次方逼近模型运算, 并对活动边缘进行了平滑化, 可以设定不同的概率以生成

相应的多边形,图2中的外围多边形表示了95%的概率多边形(probability polygons),而内部的两个小多边形则表示了50%的概率多边形。Kernel法比较客观地反映了动物的实际活动区大小,近年来被广泛使用(Worton, 1995; Elise, 1997)。除了能表示活动区域大小外,内核法还能根据点的分布揭示动物对各区域的利用程度。

虽然在ArcGIS软件包中可以通过组合试用自带的模块,但却相当烦琐。于是众多的代码爱好者基于ArcGIS的软件平台而开发出了一系列扩展插件(extension),从而可以非常方便地获得我们要求的几何属性。其典型代表,如美国地质调查局(USGS, 2003)开发的Animal Movement-系列插件以及由研究者个人开发的Hawth's Analysis Tools(Hawth, 2006)。

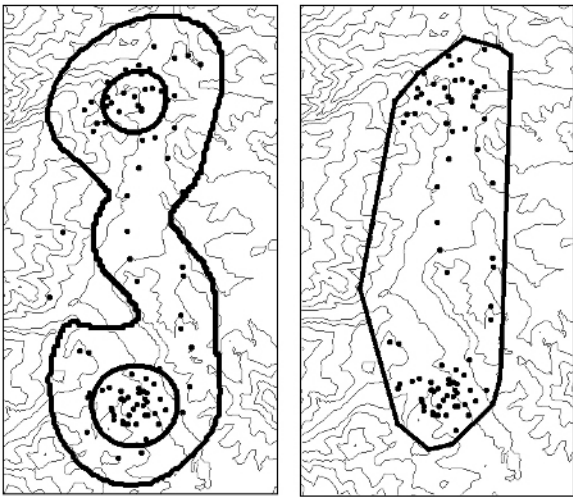


图2 分别采用Kernel法(左)和最小凸多边形法(右)得出的动物活动范围(仿USGS, 2003)  
Fig. 2 Movement area by Kernel (Left) and MCP (Right)

### 3.2 高级应用

**3.2.1 空间信息查询** 空间实体间存在着多种空间关系,如拓扑、顺序、距离、方位等,通过空间关系对实体进行查询和定位是GIS不同于一般数据库系统的功能之一。比如要查询满足下列条件的鹤群分布点:(1)在某条河流的西部;(2)距离河流不超过1000m;(3)群体组成大于10只;(4)所处的栖息地类型为某种形状。整个查询计算涉及了空间顺序方位关系(在某条河流的西部),空间距离关系(距离河流不超过1000m),空间拓扑关系(所处的栖息地类型为某种形状),甚至还包括了属

性信息查询(鹤群组成大于10只)。简单的点线面的相互关系查询包括:(1)面面查询,如与某个保护区距离不超过5km的湖有哪些;(2)面线查询,如保护区边界所紧邻的公路;(3)面点查询,如某个保护区内有多少个观测站;(4)线面查询,如某只鹤迁徙路线所经过的县;(5)线线查询,如某只雪豹的日行走路线是否与其他雪豹的日行走路线相交;(6)线点查询,如距离某条河流小于1km的鸟巢分布点;(7)点面查询,如某个鹤群的夜栖地是位于保护区的哪个分区里;(8)点点查询,如某个夜栖地是由哪些鹤共用的。

**3.2.2 叠加分析** 叠加分析是地理信息系统最常用的提取空间隐含信息的手段之一。该方法源于传统的透明材料叠加法,即将不同的数据源分别绘于透明纸上,在透光桌上将其叠放在一起,然后用笔勾出(提取)感兴趣的部分或信息。地理信息系统的叠加分析是将有关主题的数据层进行叠加产生一个新数据层的操作,其结果综合了原来两层或多层要素所具有的属性。叠加分析不仅包含空间关系的比较,还包含了属性关系的比较。地理信息系统叠加分析分为以下几类:视觉信息叠加、点与多边形叠加、线与多边形叠加、多边形叠加、栅格图层叠加(Wu et al, 2001)。叠加分析主要应用于动物的生境选择行为、迁徙行为以及保护区规划和管理等。动物的生境选择行为是进化与行为因素共同作用的结果。进化因素是指那些与动物存活价值相关的因素;而行为因素则是指动物选择生境的方式。重要的行为因素主要包括:景观和地形、食物、水、安全以及其他动物出现与否(Jiang, 2004)。在地理信息系统中,我们可以把每一种影响因子定义为一个图层,通过叠加操作就可以知道动物对某种生境的利用程度和偏好以及偏好的原因等。传统的空间统计分析方法包括主成分分析、层次分析、系统聚类、判别分析等。自20世纪90年代以来,GIS与多元统计技术相结合应用于栖息地研究。例如综合利用多元统计和GIS技术构建模型,对西双版纳热带雨林中的代表物种印度野牛(*Bos gaurus readei*)的生境进行了定量分析,其结果表明,硝塘、居民点、热带雨林、亚热带季风常绿阔叶林和竹林混交林对印度野牛生境选择存在显著影响,也暗示热带林的破坏已威胁到印度野牛的生存(Zhang et al, 2000)。叠加操作的另外一个重要作用就是评估保护区的效能,为保护管理提供决策依

据。如 Kanai (1995, 1996) 通过卫星跟踪白鹤发现, 白鹤在俄罗斯印迪吉尔卡河下游和中国鄱阳湖之间迁徙, 在其主要越冬地鄱阳湖, 竟有 50% 的活动位点分布在保护区之外, 因此适当扩大保护区范围就显得格外重要, 同时也得到了对白鹤迁徙有重要意义的停歇地, 如齐齐哈尔白城地区、山东黄河三角洲等 (图 1)。

## 4 展 望

虽然 GIS 在动物行为生态学研究中的应用越来越多并取得了很大进展, 帮助人们了解或揭示了许多过去难以企及的问题, 但其使用范围仍然受到技术和资金等诸多方面的限制。我们相信, 随着科学技术的发展与提高, 其应用面将会越来越广阔。

### 4.1 点数据是利用 GIS 进行数据分析的基础

目前对于动物活动位点的获得主要依赖于无线电遥测和卫星定位技术, 尤其是后者有着广阔的应用前景。但由于卫星跟踪器价格昂贵、稳定性不够、电池寿命短和定位精度偏低等原因, 在某种程度上限制了其使用。例如目前卫星跟踪所用的 Argos 系统的误差一般在 150 m 左右, 在鸟飞翔时的误差有时竟达 3 km。卫星跟踪所需费用动辄上万美元, 而一般电池的寿命仅有 1 年左右且不稳定 (Guan, 2000), 这使得研究者不得不尽量减少开机次数和时间以相对延长跟踪时间, 从而导致所得的数据量以及结果都大打折扣。这种情况在最近几年里也无实质性地改观。所以卫星跟踪技术要想得到普及应用急切需要解决的问题就是提高定位精度和延长电池使用时间。被动式 GPS 定位技术虽然在当前并不占据主流, 但其有定位精度高、价格适当的优势, 容易被研究者接受。如果其芯片储存信息能够实现无线传输, 应用前景无可估量。

### 4.2 GIS 自身的发展

虽然一些 GIS 软件已有了强大的可扩展性, 但

针对行为生态学研究的软件或插件仍然非常少, 功能也非常有限。所以研制开发适用于行为生态学研究的软件和插件, 将成为软件开发者和生态学研究者的迫切任务。

### 4.3 3S 技术的一体化

地理信息系统、遥感以及全球定位系统被合称为 3S 技术, 它们的结合和发展为行为生态学研究提供了广阔的空间。比如, 生境选择是行为生态学研究中的重要内容, 在传统研究中, 往往依靠大量的野外工作, 一方面要有人力追踪研究目标; 另外一方面又要花费大量人力来做野外植被调查, 耗时费力, 对于一些活动范围广阔而其活动区域人类又很难到达的物种, 采用此种方法是不现实的。随着空间信息技术的迅速发展, GPS 的定位精度将进一步提高, 遥感数据源也将不断改善, 一批高光谱、高几何分辨率、高灵敏度、多角度、多类型遥感器正不断研制并投入运行。以往难以获得的包含植被、水体、道路、居民点分布等信息的大比例尺地图已经可以通过卫星影像解译快速而准确地获得, 也为 GIS 技术的发挥提供了更为广阔的空间。将来研究者在对动物个体装配上 GPS 跟踪器之后, 可以通过网络实时接受到目标动物的空间坐标信息, 然后通过地理信息系统叠加各种遥感影像, 如植被类型、道路、居民点分布等, 就可以直接分析各种因子对动物生境选择的影响和综合作用。也就是说, 在整个研究过程当中, 研究人员无需接近自己的研究对象, 就可以对其进行实时监控和分析。虽然 3S 技术一体化在生态学研究有着美好的使用前景, 但其发展仍然是缓慢的, 原因在于: (1) 缺乏既有生态学基础又有扎实地理信息系统背景的专业研究人员; (2) 研究成本太高, 国内缺乏资料共享理念, 重复购买现象严重, 无疑又大大增大了研究成本。随着以上问题的逐步解决, 地理信息系统将作为一种基础研究工具, 将在未来行为生态学研究发挥越来越大的作用。

## 参考文献:

- ATS. 2006. Radio telemetry products list [EB/OL]. <http://www.atstrack.com/ats/products/transmitter/Transmitter.aspx>.
- Burt WH. 1943. Territoriality and home range concepts as applied to mammals [J]. *J Mamm*, 24 (3): 346-352.
- Chang KT, David LV, Jeffery JY. 1995. Spatial analysis of habitat selection by Sitka black-tailed deer in Southeast Alaska, USA [J]. *Env Man*, 19 (4): 579-589.
- Chen SP, LU XJ, Zhou CH. 2002. Introduction to Geographic Information System [M]. Beijing: Science Press. [陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 2002. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社.]
- Elise J, Gallerani L, Rodgers AR. 1997. Differences in home-range size computed in commonly used software programs [J]. *Wildl Soc Bul*, 25 (3): 721-729.
- Guan HL, Higuchi H. 2000. Review on satellite tracking of migratory birds and its prospect [J]. *Zool Res*, 21 (5): 412-415. [关鸿亮, 通口广芳. 2000. 卫星跟踪技术在鸟类迁徙研究中的应用和展望. *动物学研究*, 21 (5): 412-415.]
- Harris S, Creswell WJ, Forde PG, Trehella WJ, Woollard T, Ray SW.

1990. Home-range analysis using radio-tracking data: A review of problems and techniques particularly as applied to the study of mammals [J]. *Mamm Rev*, **20** (2-3): 97-123.
- Hawth. 2006. Hawth's Analysis Tools for Arc GIS [EB/OL]. <http://www.spatial ecology.com/htools/tool Desc.php>.
- Jakob T, Svend T, Theye J, Jonas T. 2003. Satellite tracking of Harbour Seals on Horns Reef [EB/OL]. <http://www.hornsrev.dk/>.
- Jiang ZG. 2004. Methods in Behavioral Studies and Conservation [M]. Beijing: Science Press. [蒋志刚. 2004. 动物行为原理与物种保护方法. 北京: 科学出版社.]
- Jiang ZG. 2002. Field Methods for Natural Conservation. [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House. [蒋志刚. 2002. 自然保护区野外研究技术. 北京: 中国林业出版社.]
- Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, Nagendran M, Higuchi H, Mita N. 2002. Migration routes and important resting areas of Siberian cranes (*Grus leucogeranus*) that migrate from northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking [J]. *Biol Conserv*, **106** (3): 339-346.
- Kruuk H. 1972. The Spotted Hyena [M]. Chicago: University of Chicago Press.
- Kruuk H. 1989. The Social Badger [M]. Oxford, U. K.: Oxford University Press.
- Liang W, Zheng GM, Zhang ZW, Ding CQ. 2003. Habitat use by golden pheasants (*Chrysolophus pictus*) based on radio-tracking location [J]. *Acta Zool Sin*, **49** (2): 179-184. [梁伟, 郑光美, 张正旺, 丁长青. 2003. 利用无线电遥测位点分析红腹锦鸡的生境利用. 动物学报, **49** (2): 179-184.]
- Lindeque M, Lindeque PM. 1991. Satellite tracking of elephants in northwestern Namibia [J]. *Afri Ecol*, **29** (3): 196-206.
- Lipp HP, Vysotski AL, Wolfer DP, Renaudineau S, Savini M, Tröster G, Dell'Omo G. 2004. Pigeon homing along highways and exits [J]. *Curr Biol*, **14** (14): 1239-1249.
- Ma ZJ, Ding CQ, Li XH, Lu BZ, Zhai TQ, Zheng GM. 2001. Feeding sites selection of Crested Ibis in winter [J]. *Zool Res*, **22** (1): 46-50. [马志军, 丁长青, 李欣海, 路宝忠, 翟天庆, 郑光美. 2001. 朱鹮冬季觅食地的选择. 动物学研究, **22** (1): 46-50.]
- Ma JZ, Luo LY. The application and trend of radio-tracking in America [J]. *Wildlife*, **99** (2): 30-31. [马建章, 罗理扬. 无线电跟踪技术在美国的应用情况与未来发展趋势. 野生动物, **99** (2): 30-31.]
- Peng YB, Ding P. 2005. Factors affecting movement of spring dispersal of Elliot's pheasants [J]. *Zool Res*, **26** (4): 373-378. [彭岩波, 丁平. 2005. 白颈长尾雉春季扩散活动的影响因子. 动物学研究, **26** (4): 373-378.]
- Peters R, Mech LD. 1975. Scent-marking in wolves [J]. *Amer Scient*, **63** (6): 628-637.
- Price K, Boutin S, Ydenberg R. 1990. Intensity of territorial defense in red squirrels: An experimental test of the asymmetric war attrition [J]. *Behav Ecol Sociobiol*, **27**: 217-222.
- Schaller GB, Hu J, Pan W, Zhu J. 1985. The Giant Pandas of Wolong [M]. Chicago: The University of Chicago Press.
- Seegar WS, Cutchis MR, Fuller JJ, Suter V, Bhatnager, Wall JS. 1996. Fifteen years of satellite tracking development and application to wildlife research and conservation [J]. *J H APL Techn Dig*, **17** (4): 305-315.
- Shi HT, Zheng GM. 1999. Study on the relation between habitat selection and diet of Temminck's tragopan [J]. *Zool Res*, **20** (2): 131-136. [史海涛, 郑光美. 1999. 红腹角雉取食栖息地选择的研究. 动物学研究, **20** (2): 131-136.]
- Shi JB, Zheng GM. 1995. The home range of Elliot's pheasant [J]. *J Beijing Normal Univ (Natural Science)*, **31** (4): 513-519. [石建斌, 郑光美. 1995. 白颈长尾雉的活动区. 北京师范大学学报 (自然科学版), **31** (4): 513-519.]
- Shi JB. 1996. The home range, territory and estimate methods [J]. *Bull Biol*, **31** (3): 513-519. [石建斌. 1996. 动物活动区、领域及其估算方法. 生物学通报, **31** (3): 513-519.]
- Smith CC. 1968. The adaptive nature of social organization in the genus of tree squirrel *Tamiasciurus* [J]. *Ecol Mon*, **38** (1): 31-63.
- Song YL, Zeng ZG. 2000. Home range of golden takin (*Budorcas taxicolor bedfordi*) in Foping Nature reserve [J]. *Acta Theriol Sin*, **20** (4): 241-249. [宋延龄, 曾治高. 2000. 秦岭羚牛的家域研究. 兽类学报, **20** (4): 241-249.]
- Sun YH, Zheng GM. 1992. The home range of Cabot's Tragopans by radio tracking [J]. *Acta Zool Sin*, **38** (4): 385-392. [孙悦华, 郑光美. 1992. 黄腹角雉活动区的无线电遥测研究. 动物学报, **38** (4): 385-392.]
- USGS. 2003. Animal movement analysis ArcView extension [EB/OL]. <http://www.absc.usgs.gov/globa/gistools/>
- Vincent C, McConnell BJ, Rideaux V, Fedak M. 2002. Assessment of ARGOS location accuracy from satellite tags deployed on captive gray seals [J]. *Mar Mamm Sci*, **18** (1): 156-166.
- Wang MJ, Zhong WQ. 2000. A study of home range of daurian pika (*Ochotona daurica*) through telemetry [J]. *Acta Theriol Sin*, **20** (2): 116-122. [王梦军, 钟文勤. 2000. 利用无线电技术对达乌尔鼠兔巢区的研究. 兽类学报, **20** (2): 116-122.]
- Worton BJ. 1995. Using Monte Carlo simulation to evaluate kernel-based home range estimators [J]. *J Wild Manage*, **59**: 794-800.
- Wu L, Liu Y, Zhang J, Ma XJ, Wei ZY, Tian Y. 2001. Principals, Methods and Applications of GIS [M]. Beijing: Science Press. [邬伦, 刘瑜, 张晶, 马修军, 韦中亚, 田原. 2001. 地理信息系统——原理、方法和应用. 北京: 科学出版社.]
- Wu RD. 2006. 3S-Tech Based Habitat Analysis for Yunnan Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus bieti*) [D]. M. S. thesis, Southwest Forestry University, Kunming. [武瑞东. 2006. 基于“3S”技术的滇金丝猴 (*Rhinopithecus bieti*) 生境分析. 硕士, 学位论文, 西南林学院, 昆明.]
- Yang XJ, Qian FW, Li FS, Gao LB, Wu HQ. 2005. First satellite tracking of Black-necked Crane in China [J]. *Zool Res*, **26** (6): 657-658. [杨晓君, 钱法文, 李凤山, 高立波, 伍和启. 2005. 中国首次卫星跟踪黑颈鹤迁徙研究初报. 动物学研究, **26** (6): 657-658.]
- Yang WK, Qiao JF, Gao XY, Zhong WQ. 2005. Actuality of the study on ecological biology of *Chlamydotis undulate* [J]. *Arid Zone Res*, **22** (2): 205-210. [杨维康, 乔建芳, 高行宜, 钟文勤. 2005. 波斑鸨的生态生物学研究现状. 干旱区研究, **22** (2): 205-210.]
- Zeng ZG, Song YL. 2001. Daily activity rhythm and time budget of golden takin in spring and summer [J]. *Acta Theriol Sin*, **21** (1): 7-13. [曾治高, 宋延龄. 2001. 秦岭羚牛春夏季昼夜节律与时间分配. 兽类学报, **21** (1): 7-13.]
- Zhang XH, Xu JL, Zhang ZW, Xie FL, Zhang KY, Zhu JG. 2004. A study on the incubation behavior of Reeves' pheasant (*Syrnaticus reevesii*) by radio tracking [J]. *J Beijing Normal Univ (Natural Science Edition)*, **40** (2): 255-259. [张晓辉, 徐基良, 张正旺, 谢福录, 张可银, 朱家贵. 2004. 白冠长尾雉孵卵行为的无线电遥测研究. 北京师范大学学报 (自然科学版), **40** (2): 255-259.]
- Zhang HL, Li ZX, Wang RC. 2000. A study on *Bos gaurus readei* habitat using multivariate statistical techniques and GIS [J]. *Trop Geogr*, **20** (2): 152-155. [张洪亮, 李芝喜, 王人潮. 2000. 应用多元统计技术和GIS技术进行印度野牛生境定量分析——以西双版纳纳板河流域生物圈保护区为例. 热带地理, **20** (2): 152-155.]
- Zhao QK, Zhu JG, Long YC. 1995. Wildlife Field Research and Conservation Training Manual [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press. [赵其昆, 朱建国, 龙勇诚. 1995. 野生动物研究和保护培训手册. 北京: 中国科学技术出版社.]