

生物多样性信息学进展评述

王利松¹ 陈彬¹ 纪力强² 马克平¹

¹中科院 植物研究所 ²中科院 动物研究所

【摘要】生物多样性信息学是一门年轻而蓬勃发展的新学科。它将现代的信息技术带入生物多样性及其相关学科的研究领域。它在生物多样性基础数据的数字化、模型工具、各种工具软件的开发、数据整合，全球、地区和国家尺度生物多样性信息网络等多个方面的发展，向我们展示了未来在全球范围内自由、免费共享生物多样性数据和信息，以及人们行动起来共同关注、调查与监测野外生物多样性的前景。目前，已有大量数字化的物种编目、标本馆标本、多媒体影像、研究文献等生物多样性基础信息可以通过互联网检索和利用。其中，最值得关注是一些成功的国际性研究项目，如物种 2000、全球生物多样性网络、生命条形码以及网络生命大百科全书。这些项目的成功不仅体现在对大量基础信息和数据的发布，而且它们通过与生物多样性信息标准组织 TDWG 的合作，推动了达尔文核心等一些重要的生物多样性信息标准的应用，以及地区和国家性生物多样性信息节点的建立，这些都为将来全球范围生物多样性信息的共享和数据交换奠定了重要基础。在基础数字化信息的基础上，研究人员也开发了一些在特定研究领域应用的数据挖掘和模型工具，例如基于数字化标本的地理分布预测工具 MAXENT，分类学专家知识管理的 LifeDesk。公民科学理念的发展则向我们展示了社会经济条件发展下，公众和科学爱好者广泛参与互联网为基础的生物多样性信息学研究活动。因此，生物多样性信息学的发展前景广阔，它将为我们实现全球保护战略目标，应对生物多样性危机，解决全球气候变化条件下生物多样性资源管理和利用建立坚实的信息基础。

Progress in Biodiversity Informatics

Lisong Wang¹ Bin Chen¹ Liqiang Ji² Keping Ma¹

¹ Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences ² Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences

【Abstract】 Biodiversity Informatics is a young and rapidly growing field that brings information science and technologies to bear on the data and information generated by the study of biodiversity and related subjects. Recent years, biodiversity informatics community make an extraordinary effort in digitization of primary biodiversity data, development of modelling tools, development of tools, data integration, and county/regional/global biodiversity networks. In doing so, it is creating unprecedented global sharing of information and data produced by biodiversity science, encouraging people to concern, survey and monitor natural biodiversity. At present, there are a lot of digitized information of species inventory, herbarium specimens, multimedia and literature could be available through internet, which was largely due to success of serveral international biodiversity informatics projects, such as Species 2000, Global Biodiversity Information Facility, Barcoding of Life and Encyclopedia of Life. These projects not only make great contribution in sharing digitized primary biodiversity data, but also in prompting implementation of important biodiversity information standards, such as Darwin Core, and in establishment of regional and national biodiversity networks. All these efforts will facilitate the establishment of a strong information infrastructure for data sharing and exchange at global scale in the future. Besides to browse and search a lot of digitized primary biodiversity data, scientists also build some data mining and modeling tools in speciefied research field, such as MAXENT for Ecological Niche Modelling, LifeDesk for taxonomist's knowledge management. At the same time, prompted by quick social and economic development, the idea of citizen sciences gain more and more popularity, and showing us the

situation of public user keep close contact with scientific community in doing internet-based biodiversity informatics activities. Therefore, biodiversity informatics has a broad prospect, it is also help to build strong information facilities in implementing the goals set by Global Plant Conservation Strategy and related international treaties, resolving biodiversity crisis and management of biodiversity resource in global climate change scenarios.

【关键词】 生物多样性、信息学、数据库、物种、标本、地理信息系统

【Keywords】 biodiversity、informatics、database、species、specimen、GIS

生物多样性信息学指利用信息技术，对生物有机体基础数据（primary data）的管理和算法的探究、分析和解释，尤其是在物种水平上的应用（Berendsohn & Geoffroy, 2007; Johnson, 2007; Soberon & Peterson, 2004）。它涉及到对信息的收集、存储、提交、检索和分析，主要关注单个有机体、居群和分类群以及它们的相互关系，其内容覆盖了系统学、进化生物学、居群生物学、行为科学，以及从传粉生物学到寄生病和植物群落学等领域。

作为信息学的一个分支，生物多样性信息学依赖计算机技术和信息学的普遍原则和技巧来处理异质性基础数据，同时也需新创一些方法来解决特殊性问题。例如：如何在信息系统中建立物种名称与分类群概念间的联系，从而完整记录分类学家多年来对某个物种认识的历史和变化过程；如何对早期的标本采集信息进行地标化，从而可以在大的空间尺度上进行有效地空间分析和比较；如何为不同的数据和信息对象如物种、标本、图像和文献信息建立全球信息唯一标示符，从而实现信息间的流畅共享和管理；如何能有效促进人群间的互动合作，促进人类对生物多样性的认知与针对性的活动，扩大生物多样性信息获取的源头等等。

如同生物多样性研究一样，生物多样性信息学涉及到的内容宽广而复杂。从

信息学角度说，它覆盖了从基础数据的采集、存储、整合、管理、发布和分析等多个环节，还涉及到信息共享领域内的各种数据共享政策和标准的制定。从传统研究领域说，它涉及到分类学、系统学、进化生物学、生态学、保护生物学和生物地理学等多个学科和研究领域。综合信息学的原则和所涉及生物学科的特点，其主要内容可以概括为：基础信息的数字化、信息化工具、标准和协议、模型工具以及国家和地区性生物多样性网络这 5 个方面。它们分别代表了从基础数据的收集整理、辅助性研究工具支持、信息交换和共享到数据挖掘和知识发现等信息化研究的几个重要环节，也是生物多样性信息学研究的几个最值得关注的方面。

1 基础信息的数字化

全球植物保护战略（Global Strategy for Plant Conservation：简称 GSPC）包括 16 个全球植物保护目标。为了有效地执行和实现这些目标，需要获得从小地区到全球空间尺度，涉及个体、居群、生态系统、遗传和有机体各个层次的信息和数据。Paton（2009）结合这些目标列举了潜在和已有的各种信息化资源，指出要实现这些目标需要的信息不仅数量巨大而广泛，并且需要这些信息相互联系，从而可以对它们进行综合分析和评估。

因此对基础信息的数字化我们需要优先考虑对回答生物多样性基本问题最关键的信息成分，例如物种及其地理分布。这两个方面的信息对回答如中国有多少植物物种、它们的地理分布格局如何、国家或地区尺度上应该采取什么样的保护策略等问题是非常关键的，也是保护生物学研究经常提到的问题，也是我们认知生物多样性最基本的信息元素（Sarkar, 2007）。这两方面的数据经常被国外学者称为生物多样性基础数据（Chapman, 2005b; Chavan & Ingwersen, 2009; Soberon & Peterson, 2004）。此外，我们认为生物多样性基础数据还应该包括图像和文献信息。因此，物种、标本、图像和文献基本上构成了生物多样性信息学研究最为主要的信息组分。

2 信息化工具

传统上我们对物种的鉴定主要依赖标本馆标本、图像和植物志书上的检索表或请类群研究的专家帮助。但是印刷版的检索表和鉴定工具并不能满足多样化的用户需要。因此科学家们也开发出一些电子化的检索工具。这些电子化的鉴定工具有非常长的发展历史。它们早期都被称为「专家系统」。过去40多年来，有许多这样的工具被开发出来，一些新的工具也正在研制。DELTA可能是最早和应用最为广泛的电子检索工具（Dallwitz, 1993；李健均，1996；陈翔和陈训，2008；张明理，2009），Lucid是后来形成的一个商业化产品，主要在昆虫学上有比较多的应用。由于早期计算机技术的限制，这些工具都采用一些专有的数据存储格式，并且只能在个人计算机上使用，不利于与其他数据存储进行数据交换。因此，后来的研究者开始开发一些能够在互联网上使用，便于不同系统交换数据的工具。比如eFlora的交互式检索表（Brach & Song, 2006）。这些工具很多都采用了TDWG推荐的SDD（Structured Descriptive Data）标准，并且能够和早期的DELTA数据兼容。

3 信息标准

与其它信息学相关的学科一样，生物多样性信息学也需要采用相关的数据和共享协议标准，实现数据库间数据传输和信息的互操作，加速信息交换和共享。这个过程中一般涉及到三类标准：一是数据标准（Data standards），它处理的问题是我们需要共享什么样的数据；二是协议（Protocols），它涉及的是这些信息如何进行共享；三是元数据标准（Metadata standards），它向用户提供一个信息摘要，告知用户信息系统存储的是什么样的信息，可以提供给他哪些信息。数据标准是首要和最基础的，它是实现协议和元数据标准的前提。

TDWG在这方面做出了非常卓越的贡献。这个组织早期主要致力于分类学数据库的标准建设，随着生物多样性数字化的发展，他们也开始把标准的研究扩大到整个生物多样性信息方面。这个组织到目前已经发布了涉及标本采集信息的达尔文核心（Darwin Core，简称DwC）、ABCD（Access to Biological Collection Data），

涉及植物学名和描述信息的TCS (Taxonomic Concept Transfer Schema) 和SDD (Structured Descriptive Data), 涉及植物地理分布记录的WGSRPD (World Geographical Scheme for Recording Plant Distributions) 标准, 已经整合数据和协议的SPM (Species Profile Model)、DiGIR、TAPIR等多个标准。

近年来,对信息化工作的重视和技术条件的发展促使科学家越来越重视相关标准的实践问题。例如:国内已经成立了专门处理生物学信息化标准的组织—全国生物信息标准化技术委员会(The National Technical Committee for Biological Information Standardization),来帮助相关项目和研究人员处理生物学信息标准及其相关的问题。该委员会是由国家标准化管理委员会领导和管理的从事全国性生物信息标准化工作的技术工作组织,以促进和加强生物信息资源跨国界、跨部门的整合、共享、服务和应用。

因此,为了信息化数据得到更加广泛地使用,并且在不同应用环境和研究领域发挥它最大的价值,数据提供者、管理者和使用者都需要考虑采用一致的语言来描述这些基础信息和数据。

4 模型工具

一般来说,现存的生物多样性基础数据本身并不能直接为生物多样性资源的管理和评估提供有效的决策依据。我们还需要经过筛选、统计、分析、建模以及相应的推理步骤把这些基础数据变为有用的信息。从而为我们评估现存生物多样性知识的缺失,制定将来的研究计划,评估保护的优先性等提供参考。物种地理分布的生态位模型(Ecological Niche Model:简称EMs或ENM)是一个在生态学和生物多样性信息学中快速成长的研究方向(Peterson et al., 1999; Peterson et al., 2002c)。

生态位模型的基本原理是利用地标化的标本分布信息,结合这些物种已知分布点的环境变量信息,来模拟物种的生态需求(生态位)。尽管生态位模型方法还处在一个发展的过程中,但近几年的科学家对这种模型方法的不断改善和广泛应用(Engler & Guisan, 2009; Kozak et al., 2008; Martinez-Freiria et al., 2008;

Martinez-Meyer & Peterson, 2006; Nosil & Sandoval, 2008; Peterson, 2003; Sergio et al., 2007; Steiner et al., 2008; Wang & Wang, 2006) , 已经向我们展示了它在研究全球气候变化对陆地和海洋生物多样性影响(Peterson et al., 2002a; Peterson et al., 2002b; Sergio et al., 2007; Thuiller et al., 2006) , 保护区网络设计、外来入侵物种的管理(Steiner et al., 2008) , 物种的界定(Raxworthy et al., 2007; Rissler & Apodaca, 2007) , 新物种的发现(Peterson et al., 2002a) 以及进化生物学(Carstens & Richards, 2007) 等诸多研究方向上的巨大潜力(Martinez-Meyer & Peterson, 2006; Peterson et al., 2002a; Sergio et al., 2007; Steiner et al., 2008; Stigall & Lieberman, 2006) 。

生态位模型有许多可以利用的算法和技巧 , 比如BIOCLIM(Nix, 1986) 、GLM (Generalized linear models) (Austin et al., 1994) 、GAM (Generalized additive models) (Yee & Mitchell, 1991) 、CART (Regression and classification tree analyses) (Breiman et al., 1984) 、Genetic algorithms (Stockwell & Peters, 1999) 和ANN (Artificial neural networks) (Olden & Jackson 2002) 。针对不同的数据类型和算法 , 不少开发人员也设计了许多工具来完善物种分布模型。我们还需要设计出可以方便使用不同模型 , 并且对不同模型结果进行比较分析的界面 , 从而使研究人员能够更多关注对结果的分析 and 解释。生态位模型工具的将来发展是将数据输入和投影图层的生成放在一个连续的工作流和框架下实现 , 并且可以通过远程分布式计算和网格技术加快大量数据的处理 (Canhos et al., 2004) 。

5 全球、地区和国家生物多样性网络

自1992年世界环境与发展大会召开以来 , 各国政府和从事生物多样性保护的 国际组织普遍提高了对生物多样性基础信息收集和管理的重视程度 , 开发建立了大量物种信息的联网数据库和网站。

在欧洲委员会的支持下 , 欧洲建立了几个比较大的生物多样性网络。CETAF (Consortium of European Taxonomic Facilities) (<http://www.cetaf.org/>) 联合了欧洲自然历史博物馆、植物园和其他生物学采集保藏机构的最大分类信息平台。它

包括大量动物、植物、古生物和地质学采集，向多个学科的研究人员提供信息服务。它致力于建立欧洲动物志的语义网络体系，包括了400多位动物学专家参与。欧洲动物志包括了115,000种非海洋动物物种及其地理分布等信息。这些信息和ERMS (European Register of Marine Species) 相互补充，完善了欧洲动物物种的基础信息。植物方面是欧洲植物志及欧洲-地中海植物多样性数据库 (European Flora and the Euro+Med Plant Database)。欧洲自然历史标本信息网络ENHSIN (European Natural History Specimen Information Network) 项目的目标则是在欧洲研究机构间建立起标本信息共享、互操作的信息基础。BioCASE (Biological Collection Access Service for Europe) (<http://www.biocase.org/>) 联合了欧洲30个国家的35个研究机构通过网络提供生物学采集信息的服务。欧洲生物多样性信息网络ENBI (European Network for Biodiversity Information) (<http://www.enbi.info/forums/enbi/index.php>) 项目发起于2003年，由欧盟给予经费支持，通过3年的工作完成语义网络建设项目。它实际上也是GBIF在欧洲最大的数据提供者。目前ENBI已经包括了欧洲24个国家的66个机构成员，其中包括GBIF国家节点成员。

美洲各国间生物多样性信息网络IABIN (Inter-American Biodiversity Information Network) (<http://www.iabin.net/>) 是由世界银行和全球环境基金多个机构和组织资助的覆盖西半球的生物多样性基础数据信息网络。REMIB (World Biodiversity Information Network) (http://www.conabio.gob.mx/remib_ingles/doctos/acerca_remib_ing.html) 是一个覆盖墨西哥的生物采集信息网络，目前已不仅仅包括墨西哥，而是覆盖140多个国家，拥有超过600万条的生物标本信息。澳大利亚虚拟标本馆AVH (Australian Virtual Herbarium) (<http://www.anbg.gov.au/avh/>) 是澳大利亚植物学研究群体组成的在线网络标本馆体系。除了通过GIS应用程序向用户提供650万份植物标本信息外，它的最终目标是形成一个真正电子化的植物区系研究网络，向政府、公众提供决策和信息服务。AVH是一个真正分布式的系统，在这个平台上查询的标本数据实际上都由各自的标本馆来管理和发布。

在国家科技部、环保部、中国科学院等多个部门的组织和支持下国内多年努力，也建立了动植物生物多样性信息节点 (<http://www.biodiv.gov.cn/>)、中国生物多样性信息系统 (<http://cbis.brim.ac.cn/>)、中国森林生物多样性监测网络

(<http://www.cfbiodiv.org/>)、中国生态系统研究网络 (<http://www.cern.ac.cn/0index/index.asp>)、中国自然保护区 (<http://www.nre.cn/>)、中国数字植物标本馆 (Chinese Virtual Herbarium: 简称CVH)、中国植物图像库 (Plant Photo Bank of China: 简称PPBC)、中国自然标本馆 (Chinese Field Herbarium: 简称CFH)、中国高等植物名录数据库 (Catalogue of Life: Higher Plants in China: 简称CNPC) 和中国数字植物园 (Chinese Virtual Botanical Garden: 简称CVBG)、中国植物物种信息网 (<http://www.plants.csdb.cn/>) 等一大批生物多样性基础信息系统。

近年来,由世界 40 多个机构和组织共同合作和参与的网络生命大百科全书 (EOL) 项目向我们展示一个可以在全球、地区和国家水平上使用统一的工具、标准来整合分散的生物多样性基础信息的机会。EOL 项目的发起来自有生物多样性研究之父之称的 Wilson (2003) 的一个简洁而明确的想法。那就是为地球上已知的每一个生物物种建立一个网页,这个网页将展现该物种从分类、形态、地理分布、生态、进化等宏观研究,到 DNA 条形码、分子、遗传等微观研究,以及利用和保护等百科全书式的信息集合,并且通过由文本、图像、多媒体、GIS 等多种技术手段来展现丰富的生物多样性信息。除了专业研究领域外,另外一个不容忽视的群体是社会公众对生物多样性信息基础建设的贡献和价值。公众通过公民科学的形式参加生物多样性信息的采集已经有几百年的历史 (Schnoor, 2007, Bonney et al., 2009, Silvertown, 2009)。在地理大发现与帝国主义殖民地扩张时期,大量的生物标本资料由到世界各地从事传教、探险、战争、经商等活动的非专业人员采集,成为现在生物多样性基础资料的重要组成部分。现在,世界各国社会公众关注与参与生物多样性调查的热情逐渐提高,各种技术手段已比较普及,遍布全球的生物爱好者与业余研究者已形成巨大的生物多样性信息采集与加工的潜在力量,专门为公民科学提供的野外调查工具 (Luther et al., 2009) 与网络数据积累平台也逐渐出现 (CFH: <http://www.cfh.ac.cn/>), 大大促进公民科学的参与、分享、合作和数据积累。在这方面, EOL 是融合了专家监管和公众参与的一个开放式系统。通过有效的专家体系保证数据的科学性和可靠性,同时也为对生物多样性保护和利用有热情的公众和爱好者敞开了参与“经院式”研究的大门。

6 结束语

信息技术的发展带给我们很多新的方法来共享生物多样性的基础知识。通过一些世界性的研究项目，比如网络生命大百科全书（EOL）、生物条形码协会（CBOL/BOL）、生命编目（COL）、生命之树（TOL）、全球生物多样性网络（GBIF）在电子化生物多样性信息基础方面已经建立了比较好的框架。这些项目在世界范围的广泛成功展示出电子化时代生物多样性信息采集、共享和利用的新蓝图，并且将对科学研究群体和社会有深远的影响。这些影响包括了从新物种的发现，珍稀濒危物种的保护策略的制定，新药用植物的研发，人类在复杂生命网络体系中的重要角色的认识等等。这些项目的成功要归功于信息技术在知识发现、数据整合和管理上的应用。

但是我们也要认识到生物多样性信息学研究是一个长期而艰巨的任务，还有许多未知问题值得我们去探究和解决。例如：我们需要建立一种长期机制，保证从个人和公共数据库定期收集和更新数据；通过同行评议（peer review）和自动校验方式来实现对数据质量的控制，建立对新增加信息的索引、链接和自动提交的处理流程，向用户提供不仅是数据浏览和查询，而且深层次的数据操作和分析的界面等。

参考文献

Austin, M.P., Nicholls, A.O., Doherty, M.D. and Meyers, J. A. Determining species response functions to an environmental gradient by means of a beta-function. *J. Veg. Sci.* **5**, pp. 215–228. 1994.

Berendsohn, W.G., & Geoffroy, M. Networking taxonomic concepts—uniting without "unitary-ism". pp. 13-22 in: Curry, G., & Humphries, C., (eds), *Biodiversity Databases: From Cottage Industry to Industrial Networks. Systematics Association Special*, Taylor & Francis, Boca Raton, FL. p 13-22. 2007.

- Bonney, R., C. B. Cooper, J. Dickinson, S. Kelling, T. Phillips, K. V. Rosenberg, and J. Shirk.** Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience* **59**:977-984. 2009.
- Brach, A.R., & Song, H.** eFloras: New directions for online floras exemplified by the Flora of China Project. *Taxon* **55**:188-192. 2006.
- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone.** *Classification and Regression Trees*, Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Pacific Grove, CA. 1984.
- Canhos, V.P., Souza, S., Giovanni, R., & Canhos, D.A.L.** Global Biodiversity Informatics: setting the scene for a "new world" of ecological forecasting. *Biodiversity Informatics* **1**:1-13. 2004.
- Carstens, B.C., & Richards, C.L.** Integration coalescent and ecological niche modelling in comparative phylogeography. *Evolution* **61**:1439-1454. 2007.
- Chapman, A.D. Uses of Primary Species-Occurrence Data. In. Global Biodiversity Information Facility, Copenhagen. p 106. 2005.
- Chavan, V., & Ingwersen, P.** Towards a data publishing framework for primary biodiversity data: challenges and potentials for the biodiversity informatics community. *BMC Bioinformatics* **10**:S2. 2009.
- Chen X (陈翔) · Chen X (陈训)** Application of new DELTA system in plant taxonomy-Study on *Festuca L.* as an example. *GUIHAIA (广西植物)* **28**. (in Chinese with English abstract), 2008.
- Dallwitz, M.J.** DELTA and INTKEY. Pp. 287-298 in: Fortuner, R., (ed), *Advances in Computer Methods for Systematic Biology: Artificial Intelligence, Databases, Computer Vision*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. p 287-298. 1993.

- Engler, R., & Guisan, A.** MigClim: Predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Diversity & Distributions* 15:590-601. 2009.
- Johnson, N.F.** Biodiversity Informatics. *Annual Review of Entomology* 52:421-438. 2007.
- Kozak, K.H., Graham, C.H., & Wiens, J.J.** Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology. *Trends in Ecology & Evolution* 23:141-148. 2008.
- Li JJ (李健均)** . Delta System-An International Standard for Processing Plant Taxonomic Description. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报) . 34(4). 447-452. (in Chinese with English abstract) ,1996.
- Luther, K., S. Counts, K. B. Stecher, A. Hoff, and P. Johns.** Pathfinder: An Online Collaboration Environment for Citizen Scientists. Pages 239-248 in 27th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Assoc Computing Machinery, Boston, MA. 2009.
- Martinez-Freiria, F., Sillero, N., Lizana, M., & Brito, J.C.** GIS-based niche models identify environmental correlates sustaining a contact zone between three species of European vipers. *Diversity and Distributions* 14:452-461. 2008.
- Martinez-Meyer, E., & Peterson, A.T.** Conservatism of ecological niche characteristics in North American plant species over the Pleistocene-to-Recent transition. *Journal of Biogeography* 33:1779-1789.
- Nix, H.A.** 1986. A biogeographic analysis of Australian Elapid Snakes. Pp. 5-15 in: Longmore, R., (ed), *Atlas of Elapid Snakes of Australia Australian Flora and Fauna Series Number 7*. Australian Government of Publishing Service. p 5-15. 2006.
- Nosil, P., & Sandoval, C.P.** Ecological Niche Dimensionality and the Evolutionary Diversification of Stick Insects. *PLoS ONE* 3:e1907. 2008.

- Olden, J. D. and Jackson, D. A.** 'Illuminating the "black box": A randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks', *Ecol. Model.* **154**, 135–150. 2002.
- Paton, A.** Biodiversity informatics and the plant conservation baseline. *Trends in Plant Science* 14:629-637. 2009.
- Peterson, A.T.** Predictability of the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Q. Rev. Biol.* 78:419-433. 2003.
- Peterson, A.T., Ball, L.G., & Cohoon, K.P.** Predicting distributions of Mexican birds using niche modelling methods. *Ibis* 144:e27-e32. 2002.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sanchez-Cordero, V., Soberon, J., Buddemeier, R.H., & Stockwell, D.R.B.** Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416:626-629. 2002.
- Peterson, A.T., Soberón, J., & Sánchez-Cordero, V.** Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285:1265-1267. 1999.
- Peterson, A.T., Stockwell, D.R.B., & Kluza, D.A.** Distributional prediction based on ecological niche modeling of primary occurrence data. Pp. 617-623 in: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L., & Raven, P.H., (eds), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C. p 617-623. 2002.
- Raxworthy, C.J., Ingram, C.M., Rabibisoa, N., & Pearson, R.G.** Applications of Ecological Niche Modeling for Species Delimitation: A Review and Empirical Evaluation Using Day Geckos *Phelsuma* from Madagascar. *Systematic Biology* 56:907-923. 2007.
- Rissler, L.J., & Apodaca, J.J.** Adding More Ecology into Species Delimitation: Ecological Niche Models and Phylogeography Help Define Cryptic Species in the Black Salamander (*Aneides flavipunctatus*). *Systematic Biology*

56:924-942. 2007.

Sarkar, I.N. Biodiversity informatics: organizing and linking information across the spectrum of life. *Briefings in Bioinformatics* 8:347-357. 2007.

Schnoor, J. L. Citizen science. *Environmental Science & Technology* 41:5923-5923. 2007.

Sergio, C., Figueira, R., Draper, D., Menezes, R., & Sousa, A.J. Modelling bryophyte distribution based on ecological information for extent of occurrence assessment. *Biological Conservation* 135:341-351. 2007.

Silvertown, J. A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution* 24:467-471. 2009.

Soberon, J., & Peterson, T. Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359:689-698. 2004.

Steiner, F.M., Schlick-Steiner, B.C., VanDerWal, J., Reuther, K.D., Christian, E., Stauffer, C., Suarez, A.V., Williams, S.E., & Crozier, R.H. Combined modelling of distribution and niche in invasion biology: a case study of two invasive *Tetramorium* ant species. *Diversity and Distributions* 14:538-545. 2008.

Stigall, A.L., & Lieberman, B.S. Quantitative palaeobiogeography: GIS, phylogenetic biogeographical analysis, and conservation insights. *Journal of Biogeography* 33:2051-2060. 2006.

Stockwell D.R.B. and D. Peters The GARP Modeling System: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13:2 143-158,1999.

Thuiller, W., Lavorel, S., Sykes, M.T., & Araujo, M.B. Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity

in Europe. *Diversity & Distributions* 12:49-60. 2006.

Wang, R., & Wang, Y.-Z. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China. *Diversity & Distributions* 12:397-408. 2006.

Wilson, E.O. The encyclopedia of life. *Trends in Ecology & Evolution* 18:77-80. 2003.

Yee, T.W. and Mitchell, N.D., Generalized additive models in plant ecology. *J. Veg. Sci.* 2, pp. 587–602. 1991.

Zhang ML (张明理) . DELTA system, a recommendable information processing tool for taxonomic description. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报) 18(1). (in Chinese with English abstract), 2009.

【作者简介】

马克平 男

职 称：中科院 植物研究所 研究员

职 务：中科院 植物研究所 所长

研究领域：植物生态学

个人简介：1991年7月于东北林业大学获博士学位，现为 IUCN 理事、DIWPA 执行委员会委员、DIVERSITAS 中国委员会秘书长、中科院生物多样性委员会副主任兼秘书长、中国植物学会副理事长、《生物多样性》主编。作为中国政府代表团的科学顾问，参加了多次《生物多样性公约》缔约方大会。近年来在积极推动生物标本数字化及其共享平台的建设、全国生物物种编目、森林生物多样性监测网络建设和森林生物多样性与生态系统功能研究平台的建立等。已发表学术论著 170 多篇（部），其中在

Ecology Letters、Journal of Ecology、Oikos 等国际刊物发表论文近 40 篇。

联系电话：86-10-62836223

联络邮箱：kpma@ibcas.ac.cn

纪力强 男

职 称：中科院 动物研究所 研究员

研究领域：生物多样性信息学

个人简介：1990 年在中科院动物研究所获博士学位。目前的研究方向是生物多样性信息学，主要研究生物多样性信息采集、整理、存储、处理和共享过程中的关键技术和手段，探讨生物多样性评价的方法并开发评价工具，研究制订生物多样性数据规范和标准，规划、设计并实施生物多样性信息数据库系统建设。先后主持建立了中国生物多样性信息系统和信息中心动物学分部、中国生物物种名录 (Catalogue of Life China)，以及相关的生物多样性数据库。目前任国际物种 2000 项目全球工作组成员、国际 DIVERSITAS 计划中国国家委员会副秘书长、中科院生物多样性委员会委员兼秘书、中科院科学资料委员会委员。

联系电话：86-10-64807129

联络邮箱：ji@ioz.ac.cn