•综述•

中国植物受威胁等级评估系统概述

单章建^{1,2#} 赵莉娜^{1,2#} 杨宇昌^{1,2} 谢 丹^{1,2} 覃海宁^{1,2*}

1 (中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093)

2 (中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

摘要: 濒危物种保护是生物多样性保护工作的重要组成部分, 而物种受威胁等级评估则是濒危物种保护的方向指引。经过多年的发展, 物种受威胁等级的评估由定性评估逐渐向定量评估为主、定性评估为辅的方向发展。本文综述了国内植物受威胁等级定量评估系统的研究进展, 同时介绍了国外较为成熟的IUCN红色名录评估系统、CITES评估系统、美国自然保育协会评估系统, 提出未来制定受威胁物种定量评估标准时要兼顾以下方面: (1)等级设置定义要明确、统一且合理; (2)评估标准应该量化、客观且不冗余; (3)评估系统应该适应不同地理范围, 最好能同时表达出各范围的受威胁等级; (4)评估指标要包含物种动态信息, 能定量分析物种在过去或者未来的变化。此外, 本文认为国内的物种受威胁等级定量评估系统应该形成规范化的大纲, 加大宣传力度, 尽量将理论与具体的保护行动结合起来; 同时, 我国还应该采用全球广泛应用的受威胁等级评估系统获取物种受威胁等级, 将国内生物多样性保护工作纳入到全球范围中去。

关键词: IUCN红色名录; 濒危系数; 二级模糊评价法; 层次分析法; 专家系统; 定量评估

An overview on assessment systems for threatened plants in China

Zhangjian Shan^{1,2#}, Lina Zhao^{1,2#}, Yuchang Yang^{1,2}, Dan Xie^{1,2}, Haining Qin^{1,2*}

1 State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 College of Life Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Endangered species conservation is an important part of biodiversity conservation, heavily helped by threatened species assessment guides. The assessment of threatened level has gradually evolved from being qualitative to quantitative with qualitative supplement. This paper reviews the research progress of the domestic threatened plant species quantitative assessment system, and introduces the mature IUCN Red List Assessment System, CITES Assessment System, and the National Natural Conservation Association Assessment System. Through this, we propose future development requirements of quantitative assessment criteria for threatened species should have the following characteristics: (1) a clear, unified, and reasonable definition of category setting, (2) quantitative, objective, and non-redundant criteria for endangered categories, (3) adaptation to different geographical range while simultaneously expressing threatened category over different ranges, (4) evaluation indicators contain the dynamic information of the species which can quantitatively analyze the change of the species through time. In addition, the domestic quantitative assessment system for threatened species should form a standardized outline with increased publicity to combine theoretical research with specific conservation actions. Lastly, China should adopt the widely-used endangered rating systems to assess species threatened level and integrate domestic biodiversity conservation work into the global scale.

Key words: IUCN Red List; endangerment coefficient; fuzzy two-stage comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; expert system; qualitative assessment

收稿日期: 2019-08-01; 接受日期: 2019-12-16

基金项目: 环境保护部生物多样性保护专项——中国高等植物红色名录、国家自然科学基金(31900191)和科技部国家标本资源共享平台植物子平台(2005DKA21401)

共同第一作者 Co-first authors

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: hainingqin@ibcas.ac.cn

1 背景

社会经济发展中,人们对自然资源的不合理利用与开发,导致自然环境受到了极大的破坏。物种生境退化,遗传多样性丧失,部分物种甚至面临绝灭的风险,因此保护生物多样性刻不容缓(Miller et al, 2006)。然而资源有限,现阶段无法做到对所有物种实施保护措施。因此,以最少的资源保护尽可能多的物种,以最优的资源保护最需要保护的物种是目前生物多样性保护工作的重点(蒋志刚和樊恩源, 2003)。

对物种受威胁现状进行评估并确定等级,是确定物种保护优先级最基本的工作。对物种进行受威胁等级划分既能对物种的受威胁现状和生存前景给予客观的评估,又能简单明了地显示物种的受威胁状态,提供开展物种保护及制定保护优先方案的依据。长期以来,使用较多的是定性评估系统,但这类评估系统由于过于主观而使用越来越少(IUCN/UNEP et al, 1987),取而代之的是更为客观的定量指标(Mace & Lande, 1991)。20世纪80年代以来,各国学者开始致力于物种受威胁等级定量评估方法的研究。英国学者Perring和Farrell因提出以“威胁”数值大小来确定植物受威胁程度的评定方法,成为最早的以定量指标参与评估的专家(Perring & Farrell, 1983)。该方法提出了濒危系数(endangerment coefficient)的概念,并采用了一系列的有效数据评估物种的优先保护顺序。该方法在采用受威胁数值作为评估依据时,也允许一定程度的主观意见,属半定量的方法。即便如此,该方法仍开创了定量信息参与评估的先河,从那以后,学者们逐渐加大定量化的比重,力图消除主观成分,进一步完善并逐渐形成能够在多尺度多类群层面上使用的定量评估系统(IUCN/UNEP et al, 1987)。

到目前为止,许多保护组织建立的各种全球评估系统得到了越来越多的认可,在许多国家得到推广和应用(Mace & Lande, 1991; IUCN, 2001; de Grammont & Cuarón, 2006; Miller et al, 2007)。目前,全球层面上使用较广泛的物种受威胁等级评估系统主要有: (1) IUCN提出的物种红色名录评估系统。该系统以量化分析为主,提出明晰客观的受威胁等级及评估标准。de Grammont和Cuarón (2006)在对北美各政府和组织使用最广泛的25个评估系统进

行评定后得出IUCN红色名录评估系统是最适合物种受威胁等级评估的系统。Miller等(2007)对180个《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD)签约国的调查显示,70%的国家发布了受威胁物种名录,其中78%的评估方法采用了IUCN红色名录评估系统的某个版本。(2)《濒危野生动植物物种国际贸易公约》(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES)评估系统。该系统以物种种群大小、种群数量变化、种群面积变化等相关信息为基础,结合物种贸易信息,将其列入三个绝灭风险不同的等级。该系统的建立是为了控制野生动植物的非法国际贸易(Wijnstekers, 2000),从而达到保护野生珍稀濒危物种的目的。(3)美国自然保育协会(The Nature Conservancy, TNC)评估系统。该系统由美国自然保育协会、自然遗产计划网络(Network of Natural Heritage Programs)、保育数据中心(Conservation Data Centers)等共同制定,目前在美国、加拿大、拉丁美洲国家、加勒比海国家广泛应用。该系统以物种稀有度、种群状况、物种受威胁因素等作为分级因子,将物种分为5个不同等级。此外,该评估系统为适应不同地理范围,采用了综合等级显示方式,利用字母G (Globally)、N (National)、S (Subnational)表示不同地理范围大小,数字1、2、3、4、5表示受威胁的程度依次递减。如G5S3表示全球级别(G)和亚国家(如省或州)级别(S)的等级,其中全球级别是安全,亚国家级别是易危;而N3S2则表示国家级别(N)和亚国家级别(S)的等级,其中,国家级别是易危(3),而亚国家级别是处于危险中(2)(Faber-Langendoen et al, 2012)。这几个广泛使用的评估系统其评价标准不同,但在方法上有许多可以相互借鉴之处。

我国学者使用较多的是IUCN红色名录评估系统,该系统在我国已有30多年的应用历史。本文详细介绍了IUCN红色名录评估系统在我国物种受威胁等级评估工作中的应用以及我国多类本土定量评估系统的发展历程,并通过分析各评估方法的优劣,提出可能的发展方向和建议。

2 IUCN红色名录评估系统及在中国的应用

IUCN物种红色名录濒危等级和标准(IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1)将物种

的受威胁状况分为9级: 绝灭(Extinct, EX)、野外绝灭(Extinct in the Wild, EW)、极危(Critically Endangered, CR)、濒危(Endangered, EN)、易危(Vulnerable, VU)、近危(Near Threatened, NT)、无危(Least Concern, LC)、数据缺乏(Data Deficient, DD)和未予评估(Not Evaluated, NE)。其中极危、濒危、易危3个受威胁等级含有数量化的评估标准。该评估标准有5个量化指标, 即标准A(分布范围内种群数量减少)、标准B(地理分布范围及面积、破碎化、面积下降及波动等)、标准C(种群内成熟个体数下降或减少)、标准D(极小种群或分布十分受限)和标准E(绝灭风险的定量化分析)(IUCN, 2001, 2010)。

我国植物学家早在20世纪80年代就引入了IUCN红色名录评估系统。1984年, 我国学者采用IUCN红色名录的早期系统*The IUCN Plant Red Data Book* (Lucas & Synge, 1978), 引入了濒危、稀有和渐危3个等级概念, 评估了部分物种受威胁等级, 即第一批《中国珍稀濒危保护植物名录》(国家环境保护局和中国科学院植物研究所, 1987), 并在1991年基于该名录扩展出版了《中国植物红皮书(第一册): 稀有濒危植物》(傅立国, 1991)。该名录和书籍的出版拉开了我国政府及相关组织将红色名录系统应用于物种受威胁等级评估的序幕, 奠定了我国受威胁植物研究和保护的基础。2001年, IUCN红色名录评估系统新版本(3.1版)发布, 我国学者在该版本基础上按照我国国情略作调整, 开始评估我国各生物类群。2004年, 汪松和解焱首次使用3.1版本的红色名录系统对我国野生动植物进行评估, 并出版了《中国物种红色名录, 第一卷: 红色名录》(汪松和解焱, 2004)。之后我国其他学者在工作中根据具体情况适当调整等级设置或增加相关指标进行综合评估。如国家林业局在2006年发布的中国野生植物受威胁等级划分标准中, 采用了与红色名录标准相同的等级, 仅对部分划分指标做了细微修改, 如在评估濒危等级时, 将成熟个体数下降指标由20年或5个世代内下降 $\geq 20\%$ 调整为 $\geq 50\%$ (国家林业局, 2006)。

上述各类中国植物红色名录的出版对我国的生物多样性保护及研究起到了重要作用, 但也存在明显不足, 例如评估物种数量较少, 所用资料陈旧或未能充分吸收专家参与等。为此, 2008年原环境保护部联合中国科学院启动了《中国高等植物红色

名录》的全面评估工作。该工作是我国学者使用最新的IUCN红色名录评估系统V3.1版首次评估中国所有35,000余种高等植物的受威胁状况(覃海宁和赵莉娜, 2014; Zhao et al, 2016), 共计90家科研院所和大专院校的约300位植物学专家及研究生参与信息调查或评估结果审核工作(臧春鑫等, 2016; 覃海宁和赵莉娜, 2017)。除了在国家层面大尺度范围外, IUCN红色名录评估系统也越来越多地应用到地区范围和特定类群的物种评估(Peng et al, 2008; 钟华和周彬, 2010; 田贵全等, 2012; 黄卫昌等, 2015)。

红色名录评估系统的适用性很强, 在受威胁等级评估中一个分类单元只需要符合这些标准中的任意一条, 即可被列入相应的受威胁等级。但它也存在相应的缺点: 首先, 五条标准没有全面涵盖物种的所有信息, 有些物种的信息虽然比较多, 却并不符合五个标准中的任何一个, 因此无法评出确切的等级。其次, 根据红色名录评估标准, 该系统应适用于任何类群。但事实上, 不同的类群千差万别, 从草本植物到大型哺乳动物使用的都是一套标准, 不同学者在对不同类群进行评估时, 对标准中同一个参数的理解不尽相同(Rivers, 2010; Onana & Cheek, 2011), 这就造成了评估结果的差异。

3 国内的植物受威胁等级定量评估系统

除了不断引进并推广全球评估系统, 我国学者也着力于建立具有地区特色的植物受威胁等级定量评估系统。20世纪80年代, 我国便开始了植物受威胁等级定量评估系统的研究工作。目前较为成熟的系统有: 基于濒危系数的定量评估系统(包括濒危系数结合特别考虑种的半定量评估法和濒危系数结合急切保护值的定量法)、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、二级模糊评价法(fuzzy two-stage comprehensive evaluation)、专家系统(expert system)等。基于濒危系数的评估系统在我国使用范围最为广泛, 接受度也最高, 本文将重点介绍, 同时也对其他几种定量评估系统做简要介绍。

3.1 基于濒危系数的半定量法和定量法

此方法对多个与受威胁信息相关的物种信息按照一定的方式进行分级赋值, 并在此基础上结合权重获得与物种受威胁信息相关的值(系数), 即濒危系数。这个值在获取物种保护优先顺序时承担一定的作用。基于濒危系数的评估系统获得的物种受

威胁等级常在物种保护优先顺序评定中使用,按照主观参与的程度大致分为半定量法和定量法,前者是以许再富和陶国达(1987)为代表的基于濒危系数和特别考虑种的半定量法;后者是以薛达元等(1991)为代表的基于濒危系数和急切保护值的定量法。两种模式在获取物种受威胁等级(濒危系数)时的原理大致相同,但在选择物种的指标时有所不同。

3.1.1 濒危系数 + 特别考虑种半定量法

早在30多年前,许再富和陶国达(1987)在研究国内植物受威胁保护评价方法时,从植物个体生态、种群动态、群落生态等3个方面,提出以受威胁系数结合特别考虑种的方法获得物种受威胁等级。该方法选择植物分布区类型、研究区域内分布状况、生物群落确限度、植物群落中的重要值和植物群落结构等五个方面表达植物稀有、受威胁信息,并按照信息的强弱用5到1的数量尺度进行定量标记,然后采取濒危系数(C_i)来计算评估结果:

$$C_i = \sum_{i=1}^n xi / \sum_{i=1}^n \max i \quad (1)$$

其中, xi 为第 i 个参数的定量标记值; $\max i$ 为第 i 个参数所规定的最大值。在确定物种濒危状态时,按以下等级进行划分: 当 $0.88 \leq C_i < 1.00$ 时为濒危种; 当 $0.72 \leq C_i < 0.88$ 时为渐危种; 当 $0.55 \leq C_i < 0.72$ 时为稀有种; $C_i < 0.5$ 时为安全种类(许再富和陶国达, 1987)。

在获取保护级别时,该方法还同时根据《世界自然资源保护大纲》(World Conservation Strategy, IUCN et al, 1980)中保护遗传多样性的原则,特别考虑较高级分类单位,如科和属的保护(Reveal, 1981)。根据该原则,科、属、种3个分类水平的优先保护性逐渐降低,同时考虑并沿用美国佛罗里达州动植物稀有及濒危委员会所采取的特别考虑种来校正优先次序,即一个物种通过濒危系数的计算已接近规定的受威胁等级,由于它具有重要的生态作用、科学价值或经济价值,故给予特别的考虑而视其为濒危种或稀有种(崔国发等, 2000, 2007)。该方法在我国首次以濒危系数为基础并特别考虑物种分类地位。之后该方法在我国受威胁植物评估中有一定程度的使用(庄平和吴荭, 1992; 李先琨, 1997; 崔国发等, 2000; 蒋志刚和樊恩源, 2003),但因通过特别考虑种调整物种最终的保护级别时存在较大的主观

性,而且物种的重大价值并不能精确的界定,以致近十多年来在我国的应用逐渐减少。

3.1.2 濒危系数 + 急切保护值定量法

薛达元等(1991)在对苏浙皖地区珍稀植物分级指标的研究中提出在濒危系数基础上以急切保护值判断物种保护优先级别。这类系统的主要思路是:根据物种评估指标获取物种的濒危系数,按照一定的权重分配给包括濒危系数在内的多个系数(遗传损失系数、利用价值系数、保护现状系数),最终得到物种急切保护值(也即优先保护值),进而得到相应的物种保护级别。濒危系数是根据国内分布频度、研究区域内分布频度、研究区域内现存多度、种群消失速率、种群结构等五个参考指标获取的物种受威胁程度。该方法获取物种濒危系数时与前一种方法相似(公式1),只是在定量指标的选择上不同。两者的区别主要在于获取物种保护优先级别时,该系统提出了包括濒危系数在内的多个物种信息相关的系数,并按照一定的重要性分配权重后,通过计算公式2获得急切保护值(V)及相应的保护系数,判断物种保护状况,其中濒危系数仅仅是其中一个方面。

$$V = 0.45C_i + 0.25C_h + 0.15C_v + 0.15C_p \quad (2)$$

其中, C_i 、 C_h 、 C_v 、 C_p 分别为濒危系数、遗传损失系数、利用价值系数、保护现状系数。根据 V 值的大小,按以下标准划分急切保护级别: $V \geq 0.7$, 一级急切保护; $0.6 \leq V < 0.7$, 二级急切保护; $0.5 \leq V < 0.6$, 三级急切保护; $V < 0.5$, 缓急保护(薛达元等, 1991)。

该方法将物种相关的信息进行分类,每一类单独计算其系数,并赋予一定的权重,然后通过计算公式获取物种的保护顺序值。该方法需要的物种信息类别清晰、种类多,因而许多物种,特别是信息较少的物种,无法及时得出一个合理的等级。此外,在权重分配过程中,不同的专家有不同的侧重,在一定程度上也存在主观性。尽管如此,该方法在我国使用十分广泛,得到很多专家学者的认可(姚振生等, 1997; 安慧君等, 2005; 方元平等, 2007; 石道良等, 2011)。

3.1.3 指标的选择

不管是基于濒危系数的半定量法还是定量法,都离不开定量指标的筛选及确定。学者在获取濒危系数时一般采取以下几种方法选取定量指标: (1)理论分析法: 对受威胁野生植物现状进行分析、比较,

设计出受威胁野生植物的评估指标体系。(2)频度分析法:即查阅相关文献,选择出使用频度高、具有典型性和针对性,而且数据可获得的指标,设计出受威胁野生植物的评估指标体系。(3)Delphi法、专家咨询法和调查研究分析法:这三种方法主要是广泛征求专家的意见,综合专家意见对评估指标(或评估对象)做出一定的定量与定性的阈值设定(国政和臧润国, 2013)。表1列出了近年来基于濒危系数评估物种受威胁状态及保护优先顺序时所选取的评估指标。从表中可发现,有几个指标使用频率比较高,如林区内分布状况(使用率高达80%,下同)、国内分布频度(80%)、植物群落中的重要值(60%)。指标的选择多为4–6个不等(表1),但也存在比较极端的情况,有些专家仅选择2个指标(何平等, 2003)。

3.1.4 优点及不足

总体来说,基于濒危系数的物种受威胁等级定量评估模式在一定程度上避免了评估结果的主观性,评估过程简单且可重复。这种方法初步反映了各指标的综合影响,对我国物种受威胁评估系统的发展具有重要作用,是我国定量评估方法发展的主要方向,但仍存在以下不足:

(1)受威胁等级与优先保护等级混淆不清。在评估受威胁等级时,将凸显物种重要性的信息,如物种演化地位、药用价值、生态价值等作为评估指标,这种混合的指标得出的是保护优先级,但国内很多学者常将它作为受威胁等级使用(许再富和陶国达, 1987; 崔国发等, 2000)。物种的受威胁等级是对当前环境下绝灭风险的评估,而优先保护等级涉及许多与保护行动相关的其他因素(IUCN, 2001)。

(2)受威胁指标的选择存在主观性。指标的选择多因评价目的、对象、范围等方面的不同而不同,从而形成不同的评估系统,难以获得广泛的认可,影响系统的推广应用。

(3)等级设置及阈值划分的主观性较强。系统不同,受威胁等级的设置也不相同,许再富和陶国达(1987)将物种等级设置成安全种、稀有种、渐危种、濒危种四类;而崔国发等(2007)将其设定为安全种、可能消失种、容易消失种和极易消失种,等等。因此,同一物种根据不同评估系统常被分为不同受威胁等级(李景文和李俊清, 2006)。这种不统一在今后的对比研究中会带来不便,影响对比研究。

3.2 层次分析法

层次分析法是一种简单、灵活的多维准则决策的数学方法。应用层次分析法分析问题时,首先要依据各要素之间的相互关系将问题分解,构建出系统的多级递阶层次模型,把复杂的问题系统化、层次化。通常在使用过程中,该法可以实现由定性到定量的转化,为了使决策判断定量化,通常采用判断矩阵来实现。判断矩阵表示层次结构模型中,针对上一层某元素,本层次有关元素之间两两比较而得出的相对权重,即哪一个更重要、重要多少等,可以按照1–9标度法对重要性程度赋值。

应用于物种受威胁状态评估的层次分析法一般来说包括以下过程:第一步,确定包括总体层、系统层、标准层及指标层四个层次的指标体系。第二步,通过专家对这四个层面的指标建立一、二、三级评价单元,并按照顺序求出每一评价单元中的各指标的权重。为了尽可能减少人为因素影响,专家会先对每一待定指标进行初选,并分为很重要、重要、一般和不重要等多个等级,然后对选中的指标直接给出权重。第三步,由专家按照递阶层次结构对每一个上级指标所辖的下级指标两两比较其重要程度,得出判断矩阵。第四步,计算评估指标的权重及其系数,并对其进行归一化。第五步,求出最大特征根和特征向量,并进行一致性检验。最后,计算实际指标值与标准值之间的接近程度,并通过公式3线性加权平均合成评价综合指数(C) (国政和臧润国, 2013)。

$$C = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^l (F_k \times P_k) \times R_j \right) \times W_i \right] \quad (3)$$

式中, m 、 n 、 l 分别为系统层、标准层、指标层的个数; P_k 、 R_j 、 W_i 分别为指标层、标准层和系统层各指标的权重; F_k 指实际指标值与标准值之间的接近程度。

运用层次分析法进行评价的整个过程简单明确,容易掌握,因此在我国濒危植物及其他类群的评估中得到了较多应用(陶玲等, 2001; 国政和臧润国, 2013; 秦立武等, 2015; 王建瑞等, 2015)。但在具体使用时对指标的要求较高、需要物种信息量大,不利于信息缺乏物种的受威胁状态评估,存在理论与实践脱节的情况。

表1 中国植物濒危等级评估系统的定量指标及其应用
Table 1 Quantitative index and application of assessment systems for threatened plants in China

基于濒危系数的定量评估系统 Qualitative assessment systems based on Endangerment Coefficient		Xu & Tao, 1987	Xue 1991	Mao 1994	Li, 1997	Li, 1997	Yao 1997	Yan 1997	Cui 2000	Fu 2001	Zhou, 2002	He 2003	Zhou, 2006	Li, 2006	Li & Zou, 2006	Fang 2007	He 2009	Shi 2011	Yang 2010	Cao 2012	Guo & Zang, 2013	Chen 2015	The percent of usage (%)
1	植物分布区类型 The areal-types of plants	●			●																●		15
2	林区内分布频度 Distribution frequency in the forest					●																●	35
3	研究区域内分布状况 Distribution in the region	●					●	●	●				●	●	●		●	●	●	●	●	●	80
4	国内分布频度 Distribution frequency in China		●				●	●	●				●	●	●		●	●	●	●	●	●	80
5	分布方式 Distribution pattern			●																			5
6	生物群落确限度 The limitations of biocommunity	●			●																●		15
7	植物群落中的重要值 Important values in plant communities	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●					60
8	植物群落结构 Plant community structure	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●							●		45
9	种群年龄结构 Population age structure									●						●		●	●				20
10	种群消失速率 Population disappearance rate		●	●	●	●	●	●	●				●										25
11	药用价值 Medicinal values								●						●								15
12	非药用价值 Non-medicinal values								●						●								15
13	消耗强度 Intensity of consumption														●								5
14	保护状况 Conservation status								●						●								10
15	生境适宜性 Suitability of habitat																				●		10
16	生境安全度 Habitat safety degrees								●						●							●	15
17	潜在人为破坏 Potential artificial destruction															●			●				10
18	抗灾能力 Disaster resistant ability							●						●									10
19	专业人员的管理素质 Professional's management quality								●							●			●				15
20	濒危性 Endangered status																		●	●		●	15
21	可接近度 Approachability									●											●		15
参数个数 Number of parameters		5	5	5	5	5	5	5	8	5	4	2	6	5	8	6	3	3	7	3	6	5	

3.3 二级模糊评价法

二级模糊评价法是层次分析法的进一步使用。二级模糊评价法为研究和处理具有双重不确定性的事物提供了新的方法,其核心是用参数间的模糊关系替代数学假设基础上求出的解析关系。将该方法用于植物受威胁等级评估是将保护生物学的理论和模糊数学的手段相结合,制定物种濒危度的二级模糊综合评价的数学模型,并较为客观、灵敏地计算出物种的濒危度和优先保护系数,得到基于物种受威胁等级的优先保护顺序。

魏宏图和金念慈(1994)首次将二级模糊评价法应用于我国受威胁植物——银缕梅(*Parrotia subaequalis*)的评估。该法以对小种群绝灭有影响的各种因素和物种存活条件的随机性(包括统计随机性、环境随机性、自然灾害和遗传随机性四个方面)为理论依据,同时以模糊数学的手段为计算工具,对我国银缕梅的受威胁程度及其保护顺序进行定量评估。之后,在其他类群的评估中,我国专家在二级模糊评价法的基础上,结合分类学家提出的影响受威胁物种保护顺序的评价指标进行修改,制定了较为合理的基于二级模糊评价法的物种优先保护顺序的评价指标(米凤贤, 2009^①; 郭晓莉等, 2010)。主要原理和步骤如下:

第一步,划分因素集 U 及其子集 U_k 。在受威胁植物等级评估过程中提出物种受威胁的主要影响因子并制定标准。魏宏图和金念慈(1994)提出了包括生殖生物学与生态遗传学、进化与系统学、生态地理学、人为影响、稀有濒危类型及保护管理等在内的6类因子:

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\} \quad (4)$$

$$U_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}, u_{35}\} \quad (5)$$

其中, U 集合中的6个子集 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 、 U_6 互不相交;每个因素子集含有与之相关的影响因子,6个子集共计20个影响因子,如 U_3 代表生态地理学(U_3),其中的 u_{31} 代表特有度(endemicity), u_{32} 代表狭域分布(stenochory), u_{33} 代表星散分布(scattered areal), u_{34} 代表孑遗性(relic nature), u_{35} 代表生态脆弱性(site brittleness)。

第二步,初级评判。影响因子的强度分级。首先确定 U_k 中各因子起作用的大小,确定权重集合 A_k ,

对 U_k 中各个因素评定出评价集各个等级的隶属度,构成单因素评判矩阵 R_k 后进行初级评判,获得初级评判值 B_k 。

$$A_k = \{a_{k1}, a_{k2}, a_{k3} \cdots a_{kn}\} \quad (6)$$

$$A_k \times R_k = B_k = \{b_{k1}, b_{k2}, b_{k3} \cdots b_{kn}\} \quad (7)$$

其中, n 、 k 分别为第 k 个因素子集的 n 项影响因素。

魏宏图和金念慈(1994)在进行重要性评估代码确定时,主要依据每个指标对绝灭概率的作用不同。

第三步,二级模糊综合评判。根据二级指标的评估代码建立相应系数矩阵 $A = \{a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n\}$,再将一级评判中,各类因素子集 U_k 的评判结果 B_k 构成二级评判矩阵 R ,并进行二级评判式:

$$R = \{B_1, B_2, B_3 \cdots B_n\} \quad (8)$$

$$A \times R = B = \{b_1, b_2, b_3 \cdots b_n\} \quad (9)$$

其中 B 为最终的评判结果。

二级模糊评价法因如下原因在我国有一定程度的应用:首先,运用模糊数学理论将各因素判断矩阵的权向量作为评价指标的权重,将人的主观性进行数学表达,得出了各因素对评价指标影响程度的顺序,使受威胁程度的等级评价更加客观、准确。其次,二级模糊评价法并不是纯粹的数学模型应用,而是需要掌握包括物种分布、研究区域水平上物种的受威胁程度、保护价值等多方面信息在内的物种信息,这让评估结果更具科学意义。第三,在操作上,二级模糊评价法采取了二层指标的综合评价,不仅在第一层次指标间进行了权重分配,也根据指标的重要程度对第二层次指标进行权重分配,且较高层次的值与较低的评价结果息息相关。第四,在计算模糊值及系数设定时采取了矩阵计算,这样让同一类因子彼此关联更紧密,可以得出较为合理的评判结果。最后,规范化的操作还可以推动植物受威胁及优先保护研究的规范化。当然,二级模糊评价法也存在一定的弊端,即对物种受威胁等级的定量评估带有一定的片面性、局限性及模糊性(刘小雄等, 2001),特别是在指标选择方面存在较大的差异和侧重。此外,二级模糊评价法的数学原理较复杂,理解上可能比较困难,所以并不具备良好的推广条件。

3.4 专家系统

专家系统是人工智能(Artificial Intelligence, 简称AI)的一个分支,是一类模仿专家解决问题的计算机程序,其内部具有大量专业领域的知识,它能

① 米凤贤 (2009) 河北珍稀濒危药用植物资源研究. 硕士学位论文, 河北师范大学, 石家庄.

利用专家先验知识来解决该领域的实际问题(杨兴等, 2007)。

毛夏等(1994)在前人的基础上将专家系统引入我国植物受威胁等级评估的研究中, 探索出一套基于专家系统的受威胁植物评定分级方法。该方法带有初步智能的分级评估指标系统(计算机智能程序), 以评估指标体系为基础, 加入人类专家的评价经验, 整体上模拟人类专家的思维过程。具体原理及过程是: 初步选择基本指标, 并在基本指标基础上根据相关程度形成组合指标, 并就其权重系数广泛征求国内植物、生态等领域有关专家的意见, 设置基本指标和组合指标二者的权重系数。其中基本指标有: 国内分布频度(D_3)、种群结构(D_4)、现存多度(D_5)、分布方式(D_6)、物种消失率(D_7)、种型情况(D_8)、特有情况(D_9)、古老残遗情况(D_{10})、利用价值(D_{11})、就地保护状况(D_{12})、迁地保护状况(D_{13})等; 组合指标有: 濒危系数(D_{16})、遗传损失系数(D_{17})、价格系数(D_{18})、保护系数(D_{19})四种。计算这两类指标的总分指标。根据总分指标(含指标总分 D_{14} 和系数总分 D_{20})初步划分受威胁物种的保护级别。分值特别高的或特别低的物种, 可以做到一次划分其保护级别, 但对于处于模糊区的物种, 如果不能清楚确定其等级, 则引入专家经验。针对处于模糊区间内的物种, 分级专家系统还设定了两个特殊的指标——最小值数 N_1 (基本指标中分值为1的个数)和最大值数 N_2 (基本指标中分值达最高等级分的个数)。

专家系统的使用减轻了相关领域专家的工作负担, 集中若干专家的经验组成知识处理系统, 以多专家会诊的方式工作, 系统具备的经验更为丰富, 解决问题的效率也更高。将专家系统与受威胁植物等级评估的方法结合, 相应地产生了受威胁物种评估专家系统, 该系统兼具计算机的处理效率和受威胁物种评估专家的知识及判断力。然而, 专家系统也存在很大的缺陷, 特别是指标的选择与权重的确定是通过专家咨询而得到的, 如果咨询面不够, 指标选择不合理, 可能会对评估结果的影响比较大, 特别是处于模糊区间的物种, 往往会因为最小值数或最大值数的个数而影响最终结果, 因此在我国受威胁植物评估中的应用比较少。

3.5 其他定量评估方法

除了以上几种评估系统/方法外, 我国还有不少成型的物种受威胁等级评估系统。这些物种受威

胁等级评估系统因原理比较复杂等原因, 并没有得到推广使用, 如蒋志刚和樊恩源(2003)提出评估时应区分生态濒危物种、进化濒危物种; 对于不同生物类群, 应区分物种的生活史对策, 制定不同生活史物种的濒危标准。在分析生境面积下降速率和种群下降速率时, 对上述两类物种分别根据不同的时间尺度进行分析, 制定不同生活史物种的受威胁标准, 并区别对待特有物种。这些评估系统有些具有较好的侧重点, 弥补了许多定量评估方法的不足, 为我国物种受威胁等级的评估提供重要思路, 但也存在系统原理比较复杂或者部分物种信息难以获得等问题, 限制了系统/方法的推广应用。

4 结语

我国植物受威胁定量评估系统种类较多, 但因复杂度、科学性或是推广力度等原因, 并没有得到普及。因此, 到目前为止, 我国并没有一套完整统一的、等级标准固定的、得到大部分专家认可的植物受威胁等级定量评估指标体系。

国内定量评估系统与国际上已经发展得较为成熟的定量评估系统(如IUCN红色名录评估系统)相比, 还需进一步完善, 特别是物种居群在时间尺度上的变化。在使用IUCN红色名录评估系统的标准A时, 评估人员可根据已掌握的直接信息或者间接信息估计(推测)物种在过去(标准A1和A2)和将来(标准A3)可能的受威胁状况, 甚至可结合过去将来(A4)的变化趋势评估物种的受威胁状况, 而本土定量评估系统几乎没有反映物种居群动态变化、栖息地动态变化的信息。同时, 指标的选择不宜过多, 因为部分具有短板效应的指标可能会完全改变最终的评估结果, 因此建议选择几个重要的且能代表物种野外居群现状的信息指标即可。当然, 国内评估系统也有值得红色名录评估系统借鉴的地方, 如国内评估系统常常使用的研究区域分布状态和分布频度等指标(表1)是比较容易获取的信息, 对于因数据缺乏而被IUCN红色名录评估系统评估为DD等级的物种来说, 具有补充作用。

通过全面分析国内植物受威胁等级定量评估系统与国外几种广泛应用的植物受威胁等级定量评估系统可知, 一个成熟的植物受威胁等级评估系统必须具备以下要求: (1)受威胁等级的设置应该定义明确、统一且合理, 能够真实地反映整个物种受

威胁状态,并且也方便地区之间的信息交流和合作。此外,物种受威胁等级应该与保护优先级进行区分。国内的受威胁等级评估系统,特别是基于濒危系数的评估系统,受威胁等级及保护优先级两个概念有时候是混淆的。物种受威胁等级是物种保护优先级必须考虑的一个重要的信息,除此之外还要考虑其他信息,如保护措施的有效性、经济价值、社会认可度等(de Grammont & Cuarón, 2006)。(2)评估系统应该具备定量的评估标准,标准应客观合理且不冗余,且应该与分布范围、个体数量等物种信息相关。不应该列入模棱两可的信息,也就是不同的评估者要能够通过同一套物种数据得到同一个等级,这样就能保证评估系统的准确性。(3)评估系统能够在多个尺度范围内使用。在不同的地理尺度上使用同一套评估标准时,可能会出现大的地理尺度上受威胁而在小的地理尺度上不受威胁的结果,比如在IUCN红色名录评估系统中,根据数量和分布区指标存在全球性衰退的物种被划分到易危,在地区评估中可能因其族群数稳定而被定为无危。反之,也可能会有在大尺度地理范围不受威胁而小尺度地理范围受威胁的结果。因此,在等级表达方面应该有所创新,比如,同时表达出不同尺度范围的等级。如美国自然保育协会评估系统在描述物种受威胁等级时同时展示两个地理范围的等级(Faber-Langendoen et al, 2012)。这种综合等级显示方式可以反映物种在多尺度的受威胁状况,在制定全球保护行动和国家保护策略时,可以综合考虑物种在不同尺度的受威胁状况,使保护措施更加具体,更具针对性。(4)评估指标应该包含一系列动态信息(IUCN, 2001, 2010; de Grammont & Cuarón, 2006)。评估人员可以基于已知的信息评估物种在过去和将来的动态变化。如IUCN红色名录评估系统中,通过对三个受威胁等级的绝灭率进行量化分析(标准E),就可以基于已知信息定量分析居群随时间的变化。

物种受威胁等级评估是一个任重道远的工作,它为制定保护优先行动迈出了关键的一步,能够为稀缺的保护相关的信息提供必要的补充。如目前有多少受威胁的物种、物种的受威胁程度、物种受到的威胁因素、有多少已知的物种已经绝灭、哪些类群受威胁情况比较严重、哪些常见的有特殊价值的类群即将绝灭等等。然而,获得物种的受威胁等级只是工作的起点,后续工作需要及时跟上,如制订

规范的物种评价程序及配套的规章制度,建立包括分类学、生态学、保护生物学等相关领域的专家库(尤其是包括专科、专属领域的研究专家和地方一级的专家、科研及保护人员信息库),并及时分析出需要继续加大投入的物种类群及保护空缺,同时还应该增加评价过程的透明度并广泛吸收各方面的意见和信息反馈,制订有关数据采集、关键指标阈值确定、物种评估等方面的规范性文件,鼓励专家、地方保护机构或感兴趣者提出有关物种的受威胁状态评价申请,进一步促进物种相关数据信息的采集及物种受威胁状态评价工作的开展。

5 展望

物种受威胁等级名录对于国家制定物种保护优先级必不可少。只有在同一评估系统下评估物种受威胁状态,才能得到更加合理可靠的受威胁等级,有限的保护资源才能分配得更加合理、高效。近年来,随着生物多样性问题的区域化及全球化,各国更倾向于加强与周边地区的合作,实现生物多样性保护的区域化、国际化(马克平, 2013)。在全球生物多样性保护信息共享和可持续发展的要求下,使用同一个评估系统评估物种受威胁等级逐渐得到各国的认同,特别是以IUCN红色名录为代表的全球层面、区域层面、国家层面的评估系统越来越得到认可和推广。加强区域物种受威胁等级评估工作的合作是全球生物多样性保护工作的重点。作为生物多样性大国,国内的植物受威胁等级定量评估系统应该依据上述的四个原则继续完善,形成与IUCN红色名录评估系统一样规范性的评估文件,同时积极推广应用,将理论与具体的保护行动结合起来。此外,还应该采用全球认可的评估标准获得物种受威胁等级信息,将本国生物多样性保护工作纳入全球范围内,让保护工作更加合理。

参考文献

- An HJ, Liu JH, Zhang T (2005) Study on definition of endangering standard of exclusive plants in Eastern Alashan-Western Erdos. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 19, 194-200. (in Chinese with English abstract)
- [安慧君, 刘佳慧, 张韬 (2005) 东阿拉善-西鄂尔多斯狭域特有植物濒危分级标准与优先保护级的确定研究. *干旱区资源与环境*, 19, 194-200.]
- Cao W, Li Y, Cong XX (2012) Quantitative evaluation of conservation priority of the endangered plants in Northeast

- China. Forest Research, 25, 190–194. (in Chinese with English abstract) [曹伟, 李岩, 丛欣欣 (2012) 中国东北濒危植物优先保护的定量评价. 林业科学研究, 25, 190–194.]
- Chen RB, Zhang GF, Liu J, Li S (2015) Endangerment grade and protection priority of rare plant species in Baohuashan National Forest Park, Jiangsu Province. Journal of Ecology and Rural Environment, 31, 174–179. (in Chinese with English abstract) [陈瑞冰, 张光富, 刘娟, 李硕 (2015) 江苏宝华山国家森林公园珍稀植物的濒危等级及优先保护. 生态与农村环境学报, 31, 174–179.]
- Cui GF, Cheng KW, Lu DZ, Wang JZ, Li JQ (2000) Evaluation on threatened situation and protection classes of vegetation in Beijing Labagoumen Reserve. Journal of Beijing Forestry University, 22(4), 8–13. (in Chinese with English abstract) [崔国发, 成克武, 路端正, 王建中, 李俊清 (2000) 北京喇叭沟门自然保护区植物濒危程度和保护级别研究. 北京林业大学学报, 22(4), 8–13.]
- Cui GF, Xing SH, Zhao B (2007) Plants and Vegetation Protection in Beijing Mountains. China Forestry Publishing House, Beijing (in Chinese) [崔国发, 邢韶华, 赵勃 (2007) 北京山地植物和植被保护. 中国林业出版社, 北京.]
- de Grammont PC, Cuarón AD (2006) An evaluation of threatened species categorization systems used on the American continent. Conservation Biology, 20, 14–27.
- Faber-Langendoen D, Nichols J, Master L, Snow K, Tomaino A, Bittman R, Hammerson G, Heidel B, Ramsay L, Young B (2012) NatureServe Conservation Status Assessments: Methodology for Assigning Ranks. NatureServe, Arlington, VA.
- Fang YP, Liu SY, Wang ZX, Lei Y, Man JS (2007) Quantitative assessment of priority for conservation of the national protected plants in Qizimeishan Mountain Nature Preserve. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 27, 348–355. (in Chinese with English abstract) [方元平, 刘胜祥, 汪正祥, 雷耘, 满金山 (2007) 七姊妹山自然保护区野生保护植物优先保护定量研究. 西北植物学报, 27, 348–355.]
- Fu LK (1992) The Red Data Book of China's Plants, Vol. 1: Rare and Endangered Species. Science Press, Beijing.
- Fu ZJ, Ge YG, Zhang P (2001) A quantitative analysis on priority of conservation of the national protected plants in Taibai Mountain. Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition), 14, 422–424. (in Chinese with English abstract) [傅志军, 葛永刚, 张萍 (2001) 太白山国家保护植物优先保护顺序的定量分析. 信阳师范学院学报(自然科学版), 14, 422–424.]
- Guo XL, Zhao JC, Peng XJ (2010) Rare and endangered medicinal plants in Hebei Province, China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 24(4), 144–149. (in Chinese with English abstract) [郭晓莉, 赵建成, 彭献军 (2010) 河北珍稀濒危药用植物资源研究. 干旱区资源与环境, 24(4), 144–149.]
- Guo Z, Zang RG (2013) Evaluation index system of endangered levels of the wild plants with tiny population in China. Scientia Silvae Sinicae, 49(6), 10–17. (in Chinese with English abstract) [国政, 臧润国 (2013) 中国极小种群野生植物濒危程度评价指标体系. 林业科学, 49(6), 10–17.]
- He F, Liu XL, Qing HY, He YP, Cai XH, Long TL, Ma QY (2009) A discussion on distributing laws and protected grades of protection plants in Western Sichuan Province. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 30(6), 34–39. (in Chinese with English abstract) [何飞, 刘兴良, 青华永, 何亚平, 蔡小虎, 隆廷伦, 马钦彦 (2009) 川西保护植物分布规律及保护等级划分探讨. 四川林业科技, 30(6), 34–39.]
- He P, Xiao YA, Li XH (2003) Quantitative study of conservation priority of the rare and threatened plants in Jiangxi Province. Journal of Wuhan Botanical Research, 21, 423–428. (in Chinese with English abstract) [何平, 肖宜安, 李晓红 (2003) 江西珍稀濒危植物优先保护定量研究. 武汉植物学研究, 21, 423–428.]
- Huang WC, Zhou XY, Ni ZY, Shao L (2015) An assessment of the extinction risk of *Calanthe* from China based on specimens and field observations. Biodiversity Science, 23, 493–498. (in Chinese with English abstract) [黄卫昌, 周翔宇, 倪子轶, 邵丽 (2015) 基于标本和分布信息评估中国虾脊兰属植物的濒危状况. 生物多样性, 23, 493–498.]
- IUCN (2001) IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/RL-2001-001.pdf/>. (accessed on 2017-07-17)
- IUCN Standards and Petitions Subcommittee (2010) Guidelines for using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 8.1. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee in March 2010. <http://intranet.iucn.org/webfiles/doc/SSC/RedList/RedListGuidelines.pdf/>. (accessed on 2010-08-05)
- IUCN/UNEP, Fitter R, Fitter M (1987) The Road to Extinction, IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- IUCN, UNEP, WWF (1980) World Conservation Strategy. IUCN, Gland.
- Jiang ZG, Fan EY (2003) Exploring the endangered species criteria: Rethinking the IUCN Red List Criteria. Biodiversity Science, 11, 383–392. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 樊恩源 (2003) 关于物种濒危等级标准之探讨——对IUCN物种濒危等级的思考. 生物多样性, 11, 383–392.]
- Li JW, Li JQ (2006) Forest Biodiversity Protection Research. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李景文, 李俊清 (2006) 森林生物多样性保护研究. 中国林业出版社, 北京.]
- Li XK (1997) A assessment of rare and endangered plants for priority of conservation in Guangxi. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 13(3), 9–16. (in Chinese with English abstract) [李先琨 (1997) 广西珍稀濒危植物优先保护评价. 广西科学院学报, 13(3), 9–16.]
- Liu XX, Yan LH, Liu XP (2001) Study on superior conservation grading index of the rare plants. Journal of Xiangtan

Normal University (Natural Science Edition), 23(2), 42–46. (in Chinese with English abstract) [刘小雄, 颜立红, 刘享平 (2001) 珍稀植物优先保护分级指标的研究. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 23(2), 42–46.]

Lucas G, Synge (1978) The IUCN Plant Red Data Book. IUCN, Switzerland.

Ma KP (2013) On Asia Biodiversity Conservation and Database Network. *Biodiversity Science*, 21, 515–516. (in Chinese) [马克平 (2013) 亚洲生物多样性保护与信息网络: ABCDNet. 生物多样性, 21, 515–516.]

Mace GM, Lande R (1991) Assessing extinction threats: Toward a revaluation of IUCN threatened species categories. *Conservation Biology*, 5, 148–157.

Mao X, Jiang MK, Zheng LX (1994) The evaluation and gradation expert system for rare and endangered plants. *Rural Eco-Environment*, 10(3), 18–21. (in Chinese with English abstract) [毛夏, 蒋明康, 郑龙翔 (1994) 珍稀濒危植物评价分级专家系统研究. 农村生态环境, 10(3), 18–21.]

Miller RM, Rodríguez JP, Aniskowicz-Fowler T, Bambaradeniya C, Boles R, Eaton MA, Gärdenfors U, Keller V, Molur S, Walker S, Pollock C (2006) Extinction risk and conservation priorities. *Science*, 313, 439–442.

Miller RM, Rodríguez JP, Aniskowicz-Fowler T, Bambaradeniya C, Boles R, Eaton MA, Gärdenfors U, Keller V, Molur S, Walker S, Pollock C (2007) National threatened species listing base on IUCN criteria and regional guidelines: Current status and future perspectives. *Conservation Biology*, 21, 684–696.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences (1987) China List of Rare and Endangered Plants, Vol. 1. Science Press, Beijing. (in Chinese) [国家环境保护局, 中国科学院植物研究所 (1987) 中国珍稀濒危保护植物名录(第一册). 科学出版社, 北京.]

Onana JM, Cheek M (2011) Red List Book of the Flowering Plants of Cameroon: IUCN Global Assessments. Kew Publishing, London.

Peng XJ, Zhao JC, Li L, Sun YZ, Niu YL, Guo XL (2008) Assessment of Hebei flora against the IUCN Red List Criteria in China. *Frontiers of Biology in China*, 3, 176–186.

Perring FH, Farrell L (1983) British Red Data Books. 1. Vascular Plants, 2nd edn. Royal Society for Nature Conservation, Lincoln.

Qin HN, Zhao LN (2014) China higher plants and their threatened status. In: *The Principles of Conservation Biology* (eds Jiang ZG, Ma KP), pp. 117–148. Science Press, Beijing. (in Chinese) [覃海宁, 赵莉娜 (2014) 中国高等植物及其濒危现状. 见: 保护生物学原理(蒋志刚, 马克平著), 117–148页. 科学出版社, 北京.]

Qin HN, Zhao LN (2017) Evaluating the threat status of higher plants in China. *Biodiversity Science*, 25, 689–695. (in Chinese with English abstract) [覃海宁, 赵莉娜 (2017) 中国高等植物濒危状况评估. 生物多样性, 25, 689–695.]

Qin LW, Xiao Y, Fan YG, Zhao W, Zhao Y, Jin H, Yin H, Huang XT (2015) Assessment of the endangered status and conservation priorities for plants in the alpine tundra of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 134–141. (in Chinese with English abstract) [秦立武, 肖影, 范宇光, 赵伟, 赵莹, 金慧, 尹航, 黄祥童 (2015) 长白山高山苔原带植物濒危现状及保护级别评估. 生态学报, 35, 134–141.]

Reveal JL (1981) The concepts of rarity and population threats in plant communities. In: *Rare Plant Conservation: Geographical Organization* (eds Morse LE, Henefin MS), pp. 41–47. The New York Botanical Garden, New York.

Rivers MC (2010) Subpopulations, locations and fragmentation: Applying IUCN Red List Criteria to herbarium specimen data. *Biodiversity Conservation*, 19, 2071–2085.

Shi DL, Mei H, Zhang Y, Deng CS, Lu YY, Meng FL, Hu L (2011) Quantitative study on priority for conservation of the wild protected plants in Houhe National Nature Reserve. *Journal of Hubei Forestry Science and Technology*, 168(2), 12–18. (in Chinese with English abstract) [石道良, 梅浩, 张云, 邓长胜, 路伊瑶, 孟凡琳, 胡凌 (2011) 后河自然保护区野生保护植物优先保护定量研究. 湖北林业科技, 168(2), 12–18.]

State Forestry Bureau (2006) Standard on Classifying the Threatened Status of Wild Flora in China. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese) [国家林业局 (2006) 中国野生植物受威胁等级划分标准. 中国标准出版社, 北京.]

Tao L, Li XR, Liu XM, Ren J (2001) Quantitative study of conservation grading of rare and endangered desert plants in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 37(1), 52–57. (in Chinese with English abstract) [陶玲, 李新荣, 刘新民, 任珺 (2001) 中国珍稀濒危荒漠植物保护等级的定量研究. 林业科学, 37(1), 52–57.]

Tian GJ, Song YD, Liu Q, Zong XM, Zhang XJ, Meng XL, Geng DJ, Cao ZJ (2012) Investigation and evaluation of endangered diversity in Shandong Province. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(1), 27–32. (in Chinese with English abstract) [田贵全, 宋沿东, 刘强, 宗雪梅, 张学杰, 孟祥亮, 耿德江, 曹振杰 (2012) 山东省濒危物种多样性调查与评价. 生态环境学报, 21(1), 27–32.]

Wang JR, Liu Y, Bau T (2015) Evaluation of endangered status and conservation priority of macro fungi in Shandong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 837–848. (in Chinese with English abstract) [王建瑞, 刘宇, 图力古尔 (2015) 山东省大型真菌物种濒危程度与优先保育评价. 生态学报, 35, 837–848.]

Wang S, Xie Y (2004) China Species Red List, Vol. 1: Red List. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [汪松, 解焱 (2004) 中国物种红色名录, 第1卷: 红色名录. 高等教育出版社, 北京.]

Wei HT, Jin NC (1994) Quantitative analysis of risk size of plant specie: A case of *Shaniodendron subaequale* M. B. Deng, H. T. Wei et X. Q. Wang. *Journal of Plant Resources*

- and Environment, 3(3), 1–8. (in Chinese with English abstract) [魏宏图, 金念慈 (1994) 银缕梅物种濒危度的定量分析, 植物资源与环境, 3(3), 1–8.]
- Wijnstekers W (2000) The evolution of CITES: A Reference to the Convention on International Trade in Endangered Species. CITES, Lausanne, Switzerland.
- Xu ZF, Tao GD (1987) Discussion on the method of systematic assessment to regional threatened plants and their prior conservation. Acta Botanica Yunnanica, 9, 193–202. (in Chinese with English abstract) [许再富, 陶国达 (1987) 地区性的植物受威胁及优先保护综合评价方法探讨. 云南植物研究, 9, 193–202.]
- Xue DY, Jiang MK, Li ZF (1991) Study on the grading indexes for the rare and endangered plants in Jiangsu, Zhejiang and Anhui provinces. China Environmental Science, 11(3), 161–166. (in Chinese with English abstract) [薛达元, 蒋明康, 李正方 (1991) 苏浙皖地区珍稀濒危植物分级指标研究. 中国环境科学, 11(3), 161–166.]
- Yan LH, Peng CL, Xia XM, Liao FL (1997) Study on superior conservation grading index of the rare plants of Hunan. Hunan Forestry Science & Technology, 24(3), 39–43. (in Chinese with English abstract) [颜立红, 彭春良, 夏晓敏, 廖舫林 (1997) 湖南珍稀濒危植物优先护存分级指标的研究. 湖南林业科技, 24(3), 39–43.]
- Yang H, Li PX, Dai HT (2010) Quantitative assessment for priority conservation of the wild protected plants in Jigong Mountain Nature Preserve. Central South Forest Inventory and Planning, 29(4), 50–54. (in Chinese with English abstract) [杨怀, 李培学, 戴慧堂 (2010) 河南鸡公山自然保护区野生保护植物优先保护定量分析. 中南林业调查规划, 29(4), 50–54.]
- Yang X, Zhu DQ, Sang QB (2007) Research and prospect of expert system. Application Research of Computers, 24(5), 4–9. (in Chinese with English abstract) [杨兴, 朱大奇, 桑庆兵 (2007) 专家系统研究现状与展望. 计算机应用研究, 24(5), 4–9.]
- Yao ZS, Zhang CQ, Ge F (1997) Priority assessment for the conservation of endangered medicinal plants in Jinggang Mountains, Jiangxi Province. Resources and Environment in Yangtze Valley, 6, 239–246. (in Chinese with English abstract) [姚振生, 张琮琮, 葛菲 (1997) 井冈山濒危药用植物优先保护评价. 长江流域资源与环境, 6, 239–246.]
- Zang CX, Cai L, Li JQ, Wu XP, Li XG, Li JS (2016) Preparation of the China Biodiversity Red List and its significance for biodiversity conservation within China. Biodiversity Science, 24, 610–614. (in Chinese with English abstract) [臧春鑫, 蔡蕾, 李佳琦, 吴晓甫, 李晓光, 李俊生 (2016) 《中国生物多样性红色名录》的制定及其对生物多样性保护的意义. 生物多样性, 24, 610–614.]
- Zhao LN, Li JY, Liu HY, Qin HN (2016) Distribution, congruence, and hotspots of higher plants in China. Scientific Reports, 6, 19080.
- Zhong H, Zhou B (2010) Extinction risk assessment of Pinaceae Plants in National Key Protected Wild Plants List. Journal of West China Forestry Science, 39(3), 76–78. (in Chinese with English abstract) [钟华, 周彬 (2010) 国家重点保护野生植物名录中松科植物濒危状态评估. 西部林业科学, 39(3), 76–78.]
- Zhou XR (2002) The research on the sequences of preferential protection of the rare and endangered plants in Sichuan. Life Science Research, 6, 94–97. (in Chinese with English abstract) [周先容 (2002) 四川省珍稀濒危植物优先保护序列的研究. 生命科学研究, 6, 94–97.]
- Zhou Y (2006) The research on the sequences of preferential protection of the rare and endangered plants in Changbai Mountains. Forest Research, 19, 740–749. (in Chinese with English abstract) [周繇 (2006) 长白山区珍稀濒危植物优先保护序列的研究. 林业科学研究, 19, 740–749.]
- Zhuang P, Wu H (1992) Priority assessment for conservation of threatened species at Emei Mountain. Resources Development and Conservation, 8(1), 53–56. (in Chinese with English abstract) [庄平, 吴荭 (1992) 峨眉山受威胁植物优先保护评价. 资源开发与保护, 8(1), 53–56.]
- Zou DL, He YJ, Lin QW, Cui GF, Zheng J, Dong JS, Li YB, He WC, Li CM, Zhang SX (2006) Evaluation on threatened situation and protection classes of the plants in Makehe Forest Region of Sanjiangyuan Nature Reserve, China. Journal of Beijing Forestry University, 28(3), 20–25. (in Chinese with English abstract) [邹大林, 何友均, 林秦文, 崔国发, 郑杰, 董建生, 李永波, 赫万成, 李长明, 张世玺 (2006) 三江源玛可河林区植物濒危程度和保护类别评价. 北京林业大学, 28(3), 20–25.]

(责任编辑: 臧润国 责任编辑: 黄祥忠)