•生物编目•

中国大型真菌红色名录评估研究进展

姚一建^{1*} 魏江春^{1,2} 庄文颖¹ 蔡 蕾³ 刘冬梅⁴ 李俊生⁴
魏铁铮¹ 李 熠⁵ 王 科^{1,2} 吴海军¹

1 (中国科学院微生物研究所真菌学国家重点实验室, 北京 100101)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (生态环境部自然生态保护司, 北京 100035)

4 (中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

5 (扬州大学食品科学与工程学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 大型真菌具有重要的生态价值和经济价值, 但由于环境污染、气候变化、生境丧失与破碎化, 以及资源过度利用等因素, 其生物多样性受到严重威胁。为了全面评估中国大型真菌的生存状况, 国家生态环境部(原环境保护部)联合中国科学院于2016年启动了《中国生物多样性红色名录——大型真菌卷》的编制工作。经广泛和全面收集文献资料, 依据IUCN物种红色名录等级与标准, 结合大型真菌特点和国内研究现状, 制定了中国大型真菌红色名录评估方法和流程, 动员和组织了全国相关研究力量, 对9,302种大型真菌的受威胁状况进行了评估。结果显示, 中国大型真菌受威胁物种(包括疑似灭绝、极危、濒危、易危)共97个, 占被评估物种总数的1.04%; 近危101种, 占总数的1.09%; 无危2,764种, 占总数的29.71%; 数据不足6,340种, 占总数的68.16%。此次评估工作汇集了全国140多位专家的智慧, 是国内外迄今为止涉及物种数量最大、类群范围最宽、覆盖地域最广、参与人员最多的一次大型真菌生存状况评估, 对我国大型真菌多样性保护与管理具有重要意义。

关键词: 大型真菌; IUCN等级与标准; 红色名录

Development of red list assessment of macrofungi in China

Yijian Yao^{1*}, Jiangchun Wei^{1,2}, Wenying Zhuang¹, Lei Cai³, Dongmei Liu⁴, Junsheng Li⁴, Tiezheng Wei¹, Yi Li⁵, Ke Wang^{1,2}, Haijun Wu¹

1 State Key Laboratory of Mycology, Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Department of Nature and Ecology Conservation, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035

4 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

5 School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127

Abstract: Macrofungi are important with both their ecological and socioeconomic values. Due to environmental pollution, climate change, habitat loss and fragmentation, and over-exploitation of resources, the diversity of macrofungi is under serious threatened. To evaluate the threatened status of macrofungi nationwide in China, the project of “Red List Assessment of Macrofungi in China” was officially launched in 2016 by the Ministry of Ecology and Environment (formerly the Ministry of Environmental Protection) in conjunction with the Chinese Academy of Sciences. Based on extensive and comprehensive collection of literature on the occurrence and distribution of macrofungi in China, and referring to the categories and criteria of the International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List of Species, the evaluation methods and process of the Red List of China's macrofungi were formulated according to the biological features of macrofungi and the current understanding of macrofungi in China. Experts on macrofungi around China were mobilized and organized to assess the threatened status of 9,302 species of macrofungi reported

收稿日期: 2019-05-24; 接受日期: 2019-07-02

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yaoyj@im.ac.cn

in China. Ninety-seven species are considered under threatened (including Possibly Extinct, Critically Endangered, Endangered and Vulnerable), accounting for 1.04% of the total number of species assessed; 101 species are Near Threatened, 2,764 species are Least Concern and 6,340 species are Data Deficient, occupying 1.09%, 29.71% and 68.16%, successively, of the species assessed. The assessment, which brings together the wisdom of more than 140 experts all over the country, is the first nationwide attempt to assess the threaten status of macrofungi in China, involving the largest number of macrofungal species, the widest range of macrofungal groups, the widest coverage of distribution area and the largest number of expert participants at home and abroad. It is of great significance to the conservation and management of the diversity of macrofungi in China.

Key words: macrofungi; IUCN Categories and Criteria; red list

1 中国大型真菌多样性及保护现状

1.1 大型真菌概况

大型真菌是指能形成肉眼可见的子实体、子座、菌核或菌体的一类真菌,分类学上隶属于子囊菌门和担子菌门的部分类群。大型真菌是生态系统中不可或缺的分解者,在地球生物圈的物质循环和能量流动中发挥着不可替代的作用,具有重要的生态价值;同时,许多食、药用菌与人类生产生活密切相关,具有重要的经济价值。

我国是真菌生物多样性最丰富的国家之一,国际菌物数据库(Species Fungorum, <http://www.speciesfungorum.org>)记录了全球14万多种已被发现和描述的菌物,而根据“中国菌物名录数据库”(<http://www.fungalinfo.net>)的记录,目前中国分布的菌物约有27,900种(含种下分类单元),其中大型真菌10,000种以上。

据统计,我国分布的食用菌有1,789种、药用菌798种(Fang et al, 2018),著名的食用菌有松口蘑(*Tricoloma matsutake*, 俗称“松茸”)、块菌(*Tuber spp.*, 俗称“松露”)、羊肚菌(*Morchella spp.*)、牛肝菌(*Boletus spp.*)和鸡油菌(*Cantharellus spp.*)等,著名的药用菌有冬虫夏草(*Ophiocordyceps sinensis*)、灵芝(*Ganoderma spp.*)和茯苓(*Wolfiporia cocos*)等。食用菌产业在我国已成为继粮、油、果、蔬之后的第五大农业产业。2017年,我国食用菌产量达3,842万吨,占世界总产量的75%左右,食用菌产业为我国提供了2,500万个就业岗位,实现收入2,683亿元人民币,出口额达到38.4亿美元(中商产业研究院, 2017)。

1.2 我国大型真菌受威胁现状及保护

我国是生物多样性受威胁最严重的国家之一。

20世纪90年代以来,随着经济、社会的发展和人民日益提高的物质生活水平,我国对食药菌的需求显著提高。然而,资源过度利用、环境污染、气候变化、生境丧失与破碎化等因素正威胁着大型真菌的多样性。如分布在青藏高原及周边地区的药用菌冬虫夏草,因过度采挖,其种群密度已大幅下降,加上全球气候变暖的影响,分布区不断萎缩,许多产地已很难发现其踪迹(Yan et al, 2017; Wang et al, 2018)。

党中央和国务院高度重视生物多样性保护工作,发布了《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年)》,建立了生物物种资源保护部际联席会议制度,成立了中国生物多样性保护国家委员会,制定和实施了一系列生物多样性保护规划和计划,取得了明显的成效。然而,由于缺乏对我国大型真菌资源现状和物种受威胁状况的全面了解,保护工作缺乏系统性、科学性和针对性。因此,全面评估大型真菌受威胁状况,编制红色名录,从而提出针对性的保护策略,对于加强生物多样性保护,推动实施健康中国战略具有重要意义。

2 IUCN红色名录评估方法的应用

世界自然保护联盟(IUCN)所制定和推广的红色名录等级和标准,是目前世界上使用最广的物种受威胁等级评估体系。迄今,已经有约76个国家和地区发布了动植物或真菌物种红色名录,其中70%采用了IUCN物种红色名录评估体系(<https://www.nationalredlist.org/>)。IUCN红色名录的评估主要集中在动植物,尤其是高等动植物类群。目前, IUCN网站公布的已完成评估的大型真菌(包括地衣)物种仅91个(<https://www.iucnredlist.org/>),大型真菌红色名录的评估相对于动植物的评估进程滞后很多。

欧洲是最早运用IUCN红色名录开展大型真菌评估的地区,已有多个国家发布了大型真菌红色名录,并定期更新。此外,多个国家制定了大型真菌的法律法规和保护计划,有的国家还建立了大型真菌保护区。世界各发达国家都非常重视菌物红色名录的编制工作,菌物红色名录已成为国际菌物多样性保护研究中的一个热点。为推进国际菌物红色名录的编研工作,IUCN建立了菌物物种生存委员会(Species Survival Commission for Fungi),包括了小型真菌、大型子囊菌、地衣、大型担子菌,以及锈菌和黑粉菌等5个类群的专家组。2010年,第九届国际菌物学大会决定建立国际菌物保育学会(International Society for Fungal Conservation),旨在加强受威胁菌物物种的保育工作,世界菌物红色名录编制被列入工作日程。

全世界最早的菌物红色名录是前民主德国于1982年公布的。目前,欧洲已经有31个国家发布了各自的红色名录,包括21个官方名录和10个非官方名录或初步名录,记录大型真菌超过5,500种(Senn-Irlet et al, 2007)。在欧洲以外,仅日本和新西兰公布了各自初步的菌物红色名录(Dahlberg et al, 2010)。在已公布官方菌物红色名录的欧洲国家中,57%的国家对其公布的红色名录进行过修订和再版,其中以瑞典的菌物名录更新最为及时,已经更新到了第4版。世界各国已公布的绝大多数受威胁菌物为大型真菌,奥地利和日本等国还公布了地衣的红色名录,英国和新西兰等少数国家的红色名录包括了锈菌和黑粉菌等极少数小型菌物种类(Senn-Irlet et al, 2007)。

国际物种红色名录的编制普遍采用国际自然保护联盟(International Union for the Conservation of Nature, IUCN)的物种红色名录濒危等级和标准(IUCN, 2012a, b; IUCN Standards and Petitions Subcommittee, 2016)。《IUCN物种红色名录等级与标准3.1版》将物种受威胁程度划分为灭绝、野外灭绝、极危、濒危、易危、近危、无危、数据不足和未予评估等9个等级,依据对被评估物种的种群数量、分布范围、成熟个体数及野外灭绝几率等指标的观察、估计、推断或猜测,制定了各等级评估的标准。为适应不同生物类群的评估,IUCN的每个等级都制定了多项评估依据,只需满足其中任何一项,即

可将物种列入该等级。由于IUCN物种红色名录的等级划分标准主要基于个体和种群,评估包括小型菌物在内的微生物则较为困难,因此目前各国的菌物红色名录的编制大多是针对大型真菌和地衣。此外,对于菌物而言,其成熟个体数量往往难以估计,各国在依照IUCN等级和标准的同时,主要采用种群数量、分布范围和野外灭绝几率为指标进行受威胁等级评估。

欧洲的菌物红色名录的编制工作得益于其雄厚的菌物系统学研究基础、丰富的标本储备、完善的信息平台和长期的菌物多样性监测工作。欧洲菌物分类的科学研究已经有300多年历史,拥有一支高水平的菌物分类学专家团队,多数物种的分类问题已经解决,其分布情况已较为清楚。英国皇家植物园(Kew)、荷兰菌物多样性中心(CBS)等各研究机构保存的大量模式材料和经可靠鉴定的菌物标本和菌株,为欧洲菌物物种准确鉴定和有效监测提供了坚实的基础。欧洲有12个国家完成了本国的菌物物种名录编制工作,还拥有全球最大、最权威的菌物物种名称数据库——Index Fungorum 和 MycoBank,为其红色名录的编研建立了良好的信息平台。欧洲是全世界最早开展菌物资源监测的地区。早在1910年,荷兰就已经开始了大型真菌监测工作。英国菌物红色名录是依据自1960年以来对遍布全国的样地长期定量监测的结果。欧洲已经建立了较完善的菌物监测网络,成为其菌物红色名录评估最直接的数据来源(Senn-Irlet et al, 2007)。

3 我国大型真菌红色名录评估工作开展情况

尽管我国菌物现代科学研究起步较晚,但已经具备了红色名录编制工作的基本条件。我国现代菌物学研究已有近百年历史,已建立了一支具有一定规模的菌物学专家队伍,研究范围涵盖了菌物各主要类群,对大型真菌和地衣许多重要类群进行了深入的分类学研究。中国科学院微生物研究所建立的中国菌物名录数据库,对已报道的国内分布的菌物种类及其相关信息进行了全面汇总和系统整理。目前,已完成黏菌及卵菌、接合菌、盘菌、地衣、锈菌和黑粉菌等五册《中国生物物种名录——菌物卷》印刷版的书稿,并且前三册已经正式出版。全国馆藏菌物标本物种约100万份,同时各科研机构

还保存了大量菌物菌株, 为开展菌物红色名录编研工作积累了大量研究和凭证材料。中国科学院微生物所开发的菌物标本数据库(<http://biaobenguan.im.ac.cn>), 免费推向全国, 当前的版本附带有40多万个菌物学名和作者以及我国各省市县的地理信息。

此前, 我国未对大型真菌进行全面、大规模的红色名录评估。已有的报道主要是一些菌物学者分散开展的评估分析, 大多未采用IUCN等级和标准, 缺乏全面的系统研究。虽然我国早在20世纪80年代就开展了动、植物的大规模评估工作, 并进行多次修改, 然而我国对大型真菌受威胁状况进行的评估报道仅见于21世纪初。魏江春等(2000)首次采用IUCN标准, 对我国44种地衣的受威胁状况进行评估, 指出其中38种处于易危、濒危或极危的状态。刘培贵等(2003)分析了我国大型真菌生物多样性的关键类群, 并依据动、植物的划分方法, 将大型真菌分为濒危类群、重大科学价值类群和重要经济类群等3种类型。图力古尔和戴玉成(2004)采用IUCN标准对长白山食药木腐真菌的受威胁状况进行了评估, 30个被评估物种中有野外灭绝2种、极危3种、濒危5种、易危5种。范宇光和图力古尔(2008)对长白山保护区受威胁大型真菌进行量化评价, 涉及38种, 其中极危2种、濒危4种、易危10种、近危9种、无危13种。戴玉成等(2010)参考欧洲真菌保护标准将分布于我国20个省区的48种多孔菌列为濒危物种。魏铁铮和姚一建(2010)根据IUCN物种红色名录评估等级和标准提出我国受威胁大型真菌物种有137种, 包括子囊菌14种, 担子菌123种; 其中濒危54种、易危54种、近危29种。随后就我国菌物红色名录编制问题作了进一步的探讨(魏铁铮和姚一建, 2012)。王术荣(2014)通过对西藏地区(主要包括拉萨、林芝、色季拉山和波密)大型真菌进行抽样调查和信息统计, 初步建立了濒危物种的评价体系。王薇和图力古尔(2014)和王建瑞等(2015)采用层次分析(Analytic Hierarchy Process, AHP)和专家咨询相结合的方法分别对长白山地区和山东省的大型真菌进行了优先保护评价。

2000年以来, 我国学者对大型真菌受威胁状况的评估工作进行了有益的探讨。然而, 已开展的这些评估工作所涉及的物种数量不多, 采用的评估体系和评估标准也不尽相同, 所涉及的地理区域大多比较狭窄, 难以反映我国大型真菌的整体生存状况。

在我国已报道的大型真菌中, 除了食药菌以外, 还有大量具重要经济和生态价值的种类, 在食品、医药和环保等领域具有良好的开发前景。近年来, 由于生态系统的破坏和资源的无序开发, 我国菌物资源正面临着巨大的威胁。冬虫夏草年产量已经明显下降, 许多原产地已经很少发现其踪迹。黑龙江省是我国松口蘑(*Tricholoma matsutake*)的主产地之一, 全省松口蘑年产量从20世纪90年代到2010年的十余年间下降了44% (冯磊等, 2014)。内蒙古草原上的蒙古白丽蘑(*Leucocalocybe mongolica*)因掠夺性采集, 产量明显减少、遗传多样性降低(Lu et al, 2018)。迄今为止, 国内只有冬虫夏草和松口蘑两个物种被列入国家二级保护物种名录, 大部分菌物受威胁状况不明, 菌物资源丧失的趋势未被遏制。因此, 亟需开展我国菌物红色名录编制工作, 澄清菌物资源受威胁现状, 为我国菌物资源的保护与管理提供依据, 为履行《生物多样性公约》提供技术支撑。

2016年, 生态环境部(原环境保护部)联合中国科学院启动了《中国生物多样性红色名录——大型真菌卷》的编制工作。本项目基于已有菌物分类学研究基础, 充分利用我国菌物名录和菌物标本馆为核心的菌物资源平台, 借鉴国际经验, 对中国大型真菌的受威胁状况进行了全面的评估, 编制了物种红色名录, 为菌物资源保护与管理提供依据。

4 中国大型真菌红色名录评估的结果意义

4.1 评估结果

由于IUCN红色名录评估等级和标准不完全适用于大型真菌, 本次评估对IUCN评估标准体系做了必要的调整, 并建立了中国大型真菌红色名录评估等级和标准(王科等, 2020a), 并依此开展评估。经对我国已知的大型真菌物种拉丁和汉语学名进行了全面的整理、核对和订正后, 确定被评估的中国大型真菌有9,302种, 包括大型子囊菌870种、大型担子菌6,268种、地衣型真菌2,164种(王科等, 2020b)。评估结果显示: 中国大型真菌属于疑似灭绝(PE)的1种、极危(CR)的9种、濒危(EN)的25种、易危(VU)的62种、近危(NT)的101种、无危(LC)的2,764种、数据不足(DD)的6,340种(表1)。未评出可确认为灭绝(EX)和野外灭绝(EW)的物种。本次评估结果表明, 中国大型真菌受威胁物种(包括疑似灭绝、极危、濒危、易危)共97个, 占被评估物种总数

的1.04%。受威胁、近危以及数据不足的物种均为需要关注和保护的物种。综上,中国需关注和保护的大型真菌达6,538种,占被评估物种总数的70.29%。

评估结果揭示了大型真菌受威胁的主要原因。过度采挖和开发利用,以及不良的采挖方式是食用大型真菌的主要威胁因子;环境污染和生境退化是地衣的首要受威胁因素。此外,全球气候变暖、土地利用、森林砍伐导致的栖息地丧失也是影响大型真菌生存的重要因素。

与芬兰、瑞典等欧洲国家已发布的菌物红色名录比较,本次评估受威胁物种的数量和比例较低,数据不足的数量和比例较高。其原因主要在于:(1)中国大型真菌分类学研究基础较弱,物种名称鉴定的准确性有待提升。分类学是生物多样性红色名录评估的基础,而我国大型真菌的现代分类研究起步远远落后于西方国家,我国的不少真菌物种有待深入研究和界定。(2)物种研究的基础数据不足。大型真菌研究数据信息的积累是红色名录评估的基础,我国大型真菌缺乏足够的野外考察和长期监测,大量物种因缺乏有效数据无法确定评估等级。

与我国已发布的《中国生物多样性红色名录——高等植物卷》和《中国生物多样性红色名录——脊椎动物卷》相比,本次评估的大型真菌受威胁的物种比例(1.04%)远低于植物和动物受威胁的比例(分别为10.9%和21.4%),而数据不足的物种比例(68.16%)则显著高于植物和动物(分别为10.5%和

21.6%)。这表明我国大型真菌的研究基础和数据积累相对于高等植物和脊椎动物存在着较大差距。为了提高大型真菌红色名录评估的准确性和可靠性,必须加大其分类学研究的力度,同时应开展物种调查和监测工作。

4.2 意义

本次大型真菌红色名录评估涉及的类群、物种数量、地理范围和参与的研究人员数量是世界上规模最大的一次,对大型真菌多样性保护与管理将产生深远影响,为相关管理部门和地方政府制定大型真菌保护政策和规划提供科学依据。主要意义有:

第一,红色名录为大型真菌就地保护和迁地保护规划布局提供了科学依据。本次评估结果显示,现有自然保护区对大型真菌受威胁物种分布区的覆盖程度很低。除了极少数针对某一特定物种的保护区,如天佛指山国家级自然保护区(保护松口蘑及其生态系统)、小金县冬虫夏草自然保护区(地区性保护区),绝大多数保护区未将大型真菌纳入保护范畴,大型真菌的保护几近空白。掌握大型真菌受威胁物种的地理分布和种群现状,对合理布局大型真菌自然保护地体系具有重要意义。对于就地保护无法达到保护目的的物种,应加强迁地保护的菌种资源保藏工作。

第二,红色名录为制定大型真菌保护行动和保护名录提供了基础数据。本次评估明确了中国大型真菌的受威胁现状和应该重点保护和关注的物种,有助于确定中国大型真菌保护优先顺序,确定重点

表1 中国大型真菌红色名录评估结果

Table 1 Results of the red list assessment of macrofungi in China

评估等级 Categories	类群 Taxa			总物种数 Total species (%)
	大型子囊菌 Macro-ascomycetes	大型担子菌 Macro-basidiomycetes	地衣型真菌 Lichens	
灭绝 Extinct (EX)	0	0	0	0 (0)
野外灭绝 Extinct in the Wild (EW)	0	0	0	0 (0)
疑似灭绝 Possibly Extinct (PE)	1	0	0	1 (0.01)
极危 Critically Endangered (CR)	6	0	3	9 (0.10)
濒危 Endangered (EN)	3	15	7	25 (0.27)
易危 Vulnerable (VU)	14	30	18	62 (0.67)
近危 Near Threatened (NT)	41	54	6	101 (1.09)
无危 Least Concern (LC)	189	1,918	657	2,764 (29.71)
数据不足 Data Deficient (DD)	616	4,251	1,473	6,340 (68.16)
总数 Total	870	6,268	2,164	9,302 (100)

保护物种和保护区域,也为国家和地方制定物种保护策略提供依据。例如,一些虫草类、块菌等食、药用菌物种受到严重的威胁,应该作为重点类群加以保护;云南、四川不仅大型真菌多样性最为丰富,而且也是受威胁大型真菌物种分布最为集中的省份,应作为大型真菌多样性保护重点关注的地区。

第三,红色名录为开展全国物种资源本底调查提供了理论基础。本次评估中数据不足的物种比例较高,表明我国大型真菌物种资源的本底还很不清楚,迫切需要开展物种资源本底调查,摸清我国大型真菌的分布、数量和受威胁状况,为生物多样性保护与管理提供科学支撑。

第四,红色名录为开展科普教育提供了基本信息和重要素材。大型真菌红色名录不仅明确了中国大型真菌物种的受威胁现状,也在一定程度上反映了中国大型真菌的多样性现状及其分布,是开展菌物多样性科普教育的重要素材。同时大型真菌红色名录还提出了物种保护的具体措施,不仅有利于提高公众保护意识,也利于更多的菌物爱好者更有效地参与到大型真菌的保护工作中来。

第五,红色名录是中国积极履行《生物多样性公约》的具体行动。2010年《生物多样性公约》第十次缔约方大会通过了《2020年全球生物多样性爱知目标》,要求各缔约方完成生物多样性的评价、保护和恢复工作。目前,中国是世界上为数不多的对全国范围大型真菌开展全面评估的国家。通过本次红色名录的编制,我国在大型真菌生物多样性评价方面已经先行一步,使我国在履行《生物多样性公约》方面走在世界各国的前列。

参考文献

- Bau T, Dai YC (2004) Diversity and conservation of main wood-rotting fungi in Changbai Mountains. *Journal of Fungal Research*, 2(2), 26–30. (in Chinese with English abstract) [图力古尔, 戴玉成 (2004) 长白山主要食药用水腐真菌多样性及其保育. *菌物研究*, 2(2), 26–30.]
- China Business Research Institute (2017) Market Research Report of Edible Fungi Industry in China of the Year 2017. (in Chinese) [中商产业研究院 (2017) 2017年中国食用菌产业市场前景研究报告.] <http://www.askci.com/news/channel/20171215/175617114071.shtml>. (accessed on 2018-11-12)
- Dahlberg A, Genney DR, Heilmann-Clausen J (2010) Developing a comprehensive strategy for fungal conservation in Europe: Current status and future needs. *Fungal Ecology*, 3, 50e64.
- Dai YC, Cui BK, Yuan HS, Wei YL (2010) A red list of polypores in China. *Mycosystema*, 29, 164–171. (in Chinese with English abstract) [戴玉成, 崔宝凯, 袁海生, 魏玉莲 (2010) 中国濒危的多孔菌. *菌物学报*, 29, 164–171.]
- Fan YG, Bau T (2008) Quantity evaluation on priority conservation of macrofungi in Changbai Mountain Nature Reserve. *Journal of Northeast Forestry University*, 36(11), 86–87, 91. (in Chinese with English abstract) [范宇光, 图力古尔 (2008) 长白山自然保护区大型真菌物种优先保护的量化评价. *东北林业大学学报*, 36(11), 86–87, 91.]
- Fang R, Kirk P, Wei JC, Li Y, Cai L, Fan L, Wei TZ, Zhao RL, Wang K, Yang ZL, Li TH, Li Y, Phurbu-Dorji, Yao YJ (2018) Country focus: China. In: *State of the World's Fungi. Report* (ed. Willis KJ), pp. 48–55. Royal Botanic Garden, Kew.
- Feng L, Yao HW, Xie CY, Zhang XY (2014) Research on resources and protection methods of *Tricholoma matsutake* in Heilongjiang Province. *Forest By-Product and Speciality in China*, (2), 67–68. (in Chinese) [冯磊, 么宏伟, 谢晨阳, 张学义 (2014) 黑龙江省松茸资源现状及保护方法研究. *中国林副特产*, (2), 67–68.]
- IUCN (2012a) Guidelines for Application of IUCN Red List Criteria at Regional and National Levels, Version 4.0. iii + 41pp. IUCN, Gland, Switzerland & Cambridge, UK.
- IUCN (2012b) IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. 2nd edition, iv + 32pp. IUCN, Gland, Switzerland & Cambridge, UK.
- IUCN Standards and Petitions Subcommittee (2016) Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria, Version 12. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee. <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>. (accessed on 2016-09-08)
- Liao YJ, Yu FF, Liu ZY, Xie DM (2008) The biodiversity, conservation and sustainable utilization of macrofungi resources in the Jinpo Mountain Nature Reserve in Chongqing. *Ecological Science*, 27, 42–45. (in Chinese with English abstract) [廖宇静, 于飞飞, 刘正宇, 谢德明 (2008) 重庆金佛山自然保护区大型真菌多样性及资源保护与可持续利用. *生态科学*, 27, 42–45.]
- Liu PG, Wang XH, Yu FQ, Zheng HD, Chen J (2003) Key taxa of larger member in higher fungi of biodiversity from China. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 285–296. (in Chinese with English abstract) [刘培贵, 王向华, 于富强, 郑焕娣, 陈娟 (2003) 中国大型高等真菌生物多样性的关键类群. *云南植物研究*, 25, 285–296.]
- Lu T, Bao HY, Bau T (2018) Genetic diversity and population structure of endemic mushroom *Leucocalocybe mongolica* in Mongolian Plateau uncovered by EST-SSR markers. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 32, 1195–1204.
- Senn-Irlet B, Heilmann-Clausen J, Genney D, Dahlberg A (2007) Guidance for the Conservation of Macrofungi in

Europe. Document prepared for the Directorate of Culture and Cultural Heritage, Council of Europe. Document T-PVS (2007) 13 (rev). Strasbourg 17 Oct. 2007. https://www.wsl.ch/eccf/Guidance_Fungi.pdf. (accessed on 2018-02-09)

- Wang JR, Liu Y, Bau T (2015) Evaluation of endangered status and conservation priority of macrofungi 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 K, Liu DM, Cai L, Wu HJ, Li Y, Wei TZ, Wang YH, Wu HM, Wei XD, Li BB, Li JS, Yao YJ (2020a) Methods and procedures of the red list assessment of macrofungi in China. *Biodiversity Science*, 28, 11–19. (in Chinese with English abstract) [王科, 刘冬梅, 蔡蕾, 吴海军, 李熠, 魏铁铮, 王永会, 吴红梅, 卫晓丹, 李斌斌, 李俊生, 姚一建 (2020a) 中国大型真菌红色名录评估方法和程序. *生物多样性*, 28, 11–19.]
- Wang K, Zhao MJ, Su JH, Yang L, Deng H, Wang YH, Wu HJ, Li Y, Wu HM, Wei XD, Wei TZ, Cai L, Yao YJ (2020b) The use of Checklist of Fungi in China database in the Red List Assessment of Macrofungi in China. *Biodiversity Science*, 28, 74–98. (in Chinese with English abstract) [王科, 赵明君, 苏锦河, 杨柳, 邓红, 王永会, 吴海军, 李熠, 吴红梅, 卫晓丹, 魏铁铮, 蔡磊, 姚一建 (2020b) 中国菌物名录数据库在大型真菌红色名录编制中的作用. *生物多样性*, 28, 74–98.]
- Wang SR (2014) Studies on Macrofungi Diversity in Alpine Forest Regions of Tibet. PhD dissertation, Northeast Normal University, Changchun. (in Chinese with English abstract) [王术荣 (2014) 西藏高寒森林地区大型真菌多样性研究. 博士学位论文, 东北师范大学, 长春.]
- Wang W, Bau T (2015) Diversity of mycobiota and ecology distribution of macrofungi in Changbai Mountain. *Journal of Jilin Agricultural University*, 37, 26–36. (in Chinese with English abstract) [王薇, 图力古尔 (2015) 长白山地区大型真菌的区系组成及生态分布. *吉林农业大学学报*, 37, 26–36.]
- Wang WJ, Wang K, Wang XL, Li Y, Yao YJ (2018) Investigation on natural resources and species conservation of *Ophiocordyceps sinensis*, the famous medicinal fungus endemic to the Tibetan Plateau. *Protein Cell*, 98, 671–673.
- Wei JC, Jiang YM, Guo SY (2000) Lichen conservation biology and sustainable utilization of resources. In: *Proceedings of the 2000 Cross-Strait Symposium on Biodiversity and Conservation*, pp. 307–316. Museum of Natural Science, Taizhong. (in Chinese) [魏江春, 姜玉梅, 郭守玉 (2000) 地衣保育生物学及其资源的持续利用. 见: 2000年海峡两岸生物多样性与保育研讨会论文集, 307–316页. “国立”自然科学博物馆, 台中.]
- Wei TZ, Yao YJ (2010) Fungi diversity and conservation in China—A preliminary red list of macrofungi. In: *Abstract of the 9th Biodiversity Conservation and Sustainable Use Symposium* (ed. Chinese National Committee for DIVERSITAS), pp. 94–95. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [魏铁铮, 姚一建 (2010) 中国菌物多样性保护——大型真菌初步红色名录. 见: 第九届生物多样性保护与持续利用研讨会论文摘要集(国际生物多样性计划中国委员会编), 94–95页. 中国气象出版社, 北京.]
- Wei TZ, Yao YJ (2012) A proposal on fungal red list of China. In: *Advances in Biodiversity Conservation and Research in China IX: Proceedings of the Ninth National Symposium on the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity in China* (ed. Chinese National Committee for DIVERSITAS), pp. 213–219. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [魏铁铮, 姚一建 (2012) 中国菌物红色名录编制设想. 见: 中国生物多样性保护与研究进展IX——第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集(国际生物多样性计划中国委员会编), 213–219页. 中国气象出版社, 北京.]
- Yan YJ, Li Y, Wang WJ, He JS, Yang RH, Wu HJ, Wang XL, Jiao L, Tang ZY, Yao YJ (2017) Range shifts in response to climate change of *Ophiocordyceps sinensis*, a fungus endemic to the Tibetan Plateau. *Biological Conservation*, 206, 143–150.

(责任编辑: 杨祝良 责任编辑: 时意专)