

# 气候变化对野生植物的影响及保护对策

黎磊<sup>1</sup> 陈家宽<sup>1,2\*</sup>

1 (南昌大学生命科学研究院流域生态研究所, 南昌 330031)

2 (复旦大学生物多样性科学研究所, 上海 200433)

**摘要:** 以温室气体浓度持续上升、全球气候变暖为主要特征的全球气候变化对野生植物及生物多样性造成的潜在影响, 已经引起了国际学者的高度关注。本文总结了全球气候变化的现状与未来趋势, 概述了中国野生植物的保护及管理现状, 从不同侧面综述了国内外关于全球气候变暖对野生植物影响的研究进展和动态, 包括气候带北移、两极冰山退缩、高海拔山地变暖、海平面上升、早春温度提前升高、荒漠草原土壤增温、旱涝急转弯等对野生植物造成的影响以及气候变暖对种间关系和敏感植物类群的影响, 并从气候变化背景下全球生态系统敏感度、植物多样性、物种迁移与气候槽(sink areas)、物种适应与灭绝以及物候节律5个方面分析了未来全球变暖影响野生植物的总体趋势。在以后的野生植物保护与管理中, 应确定全球气候变化的植物多样性敏感区, 重点关注对气候变化敏感的植物类群以及气候要素改变植物-动物互作关系中的野生植物, 自然保护区的建设要重点考虑全球气候变化的影响, 通过在全球范围内对野生植物分布和种群变化进行长期、系统的追踪监测, 建立有效的数据库, 发展野生植物迁地保护的保育技术及信息网络, 发展有关野生植物对全球气候变化响应的量化指标及相应的模型。最后提出应将全球气候变化下野生植物保护与管理列入相关基金会的研究重点。

**关键词:** 全球变暖, 冰川退缩, 海平面上升, 植物多样性, 物种迁移, 物候, 迁地保护

## Influence of climate change on wild plants and the conservation strategies

Lei Li<sup>1</sup>, Jiakuan Chen<sup>1,2\*</sup>

1 Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031

2 Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433

**Abstract:** Recently, the influence of climate change on wild plants has attracted keen attention from international scholars. In an effort to elucidate the importance of considering climate change effects in the conservation and management of wild plants, we first summarized the status of global climate change in the world and its trends in next 100 years, as well as the conservation status of plants in China in recent years. Specifically, we reviewed research on the potential influences of global warming on wild plants from several aspects, including northward migration of plants with shifting climate zones, glacial recession in polar regions, warming in high altitude mountains, sea level rise, advance of temperature rise in early spring, desert steppe soil temperature increase, drought-flood cycle alterations, as well as the response of interspecies relationships and sensitive plant taxa to global warming. Then, we analyzed the general trends of future global warming effects on wild plants by reviewing global ecosystem sensitivity, plant diversity, plant migration and climate sink areas, species adaptation and extinction, as well as plant phenology in the context of global warming. Finally, we suggest that key areas of plant diversity should be delineated and protected, with a focus on climate-sensitive taxa and plants that are involved with plant-animal interactions that will be affected by climate factors. The impacts of global climate change should be taken into account in the further development of nature reserves. We also recommend the establishment of a database for the long-term and systematic monitoring of wild plant distribution and population dynamics on a global scale. Technologies for ex-situ conservation of wild plants and information networks should be developed. Quantitative indices and corresponding

收稿日期: 2014-06-12; 接受日期: 2014-08-25

本文根据陈家宽于2014年3月24日在国家林业局海南海口市举办的“野生植物保护管理培训班”上的报告撰写。

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jkchen@fudan.edu.cn

models relating the response of wild plants to global climate change should be also developed. Finally, we suggest that the conservation and management of wild plants in response to global climate change should be listed as priorities by associate foundations.

**Key words:** global warming, glacial recession, sea level rise, plant diversity, species migration, phenology, *ex situ* conservation

以全球气候变化为核心的全球变化是目前人类面临的最严峻的挑战之一(李克让, 1996)。自工业革命以来, 大气中温室气体浓度剧增(IPCC, 2007), 使得全球变暖以极速蔓延的趋势席卷了整个地球。全球增温、海平面上升、雪盖消融与冰川退缩、降雨增加与干旱加剧以及由此引发的生物物候的改变, 气候变化与人类活动导致的生境片段化与丧失、外来物种入侵以及大量脆弱物种正处在濒临灭绝的边缘, 严重危及着人类生存(Brikowski *et al.*, 2008)。

全球气候变化将直接影响地球上的植物及与之休戚相关的所有生命形式。地球上现存30万种高等维管束植物物种的1/3受到威胁, 1/10左右因过度采集、掠夺性生产方式、环境污染、土地利用变化、城市化进程、外来物种入侵及气候变化等因素的影响而濒临灭绝(禹玉华等, 2008)。预期本世纪末全球地表将平均增温1.1–6.4℃(IPCC, 2007), 植物灭绝速率将进一步加快, 预计1/2的植物将会受到威胁, 甚至2/3的高等维管束植物种类将在本世纪末消失(许再富等, 2008)。

生物群落研究理论表明, 一种植物灭绝会引起10–30种其他生物丧失, 特别是许多极小种群野生植物是自然生态系统中的关键种, 一旦灭绝将可能引发连锁反应。全球气候变化的地域之广阔, 影响之深远, 已使野生植物受到前所未有的冲击。这些变化已引起人们的密切关注, 并从不同角度(如地理分布、种群与群落动态、物候节律、生活史对策等)开展了广泛的研究(Alsos *et al.*, 2007; 陈建国等, 2011; Wolkovich *et al.*, 2012)。然而, 在传统的野生植物保护与管理系统规划中, 忽略了全球气候变化将给野生植物及其生境带来的深刻而长远的影响。因此在以后的野生植物保护与管理中, 增强对气候变化对野生植物资源影响的认识, 充分考虑野生植物适应气候变化的能力, 将全球气候变化的思想融入到野生植物保护机制中, 应是本领域科学发展的重点。

## 1 全球变化、气候变化与全球气候变化

伴随着人类社会的飞速发展, 大量化石燃料燃烧释放的温室气体和污染物进入大气、水体、土壤和生物体等, 这些变化会伴随着全球化进程逐渐扩展到更大的空间范围, 从而诱发全球变化的正反馈效应(Cox *et al.*, 2000; 田汉勤等, 2007)。全球变化是指由于自然和人类双重作用造成的全球尺度上的环境变化, 主要包括大气组成与气候变化、外来物种入侵导致的生物区系变化以及人类活动导致的土地利用的变化3个方面。

气候变化是全球变化的重要组成部分(曲建升等, 2008), 指在一个特定区域内, 与多年平均水平相比, 气候平均值或离差值出现长期的统计学意义上的显著变化, 如平均气温、平均降水、最高气温、最低气温以及极端天气等的变化(IPCC, 2007)。在全球范围内, 气候平均状态统计学意义上的巨大改变或者持续较长一段时间(典型的为10年或更长)的气候变动, 即为全球气候变化。气候变化的原因可能是自然的内部进程(如太阳活动、火山爆发、大气与海洋环流的变化)或者是人为地持续对大气组成成分和土地利用的改变等。

## 2 全球气候变化的现状和未来趋势

### 2.1 全球气候变化的现状

20世纪, 包括温度与降水在内的主要气候特征发生了变化, 北半球尤其是高纬度地区受气候变化影响较大(Wen & Lin, 2003)。表现在: (1)最近100年来(1906–2005年), 全球地表平均温度上升了0.74℃, 北极升温速率几乎是全球平均速率的2倍; 北半球较高纬度地区温度升幅较大(IPCC, 2007); (2)20世纪全球陆地降水量约增加2%, 北半球中高纬度大陆地区降水量明显增多, 但是北半球副热带地区降水量可能减少了3%, 非洲北部、南美的沙漠地区减少更为明显(刘昌明等, 2008); (3)1961年以来的观测表明, 全球升温引发海水膨胀, 20世纪全球海平面

上升约0.17 m(秦大河和罗勇, 2008); (4)1978年以来, 北极海冰面积以每10年2.7%的速率退缩; (5)极端气候事件(如干旱、洪涝、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等)的发生频率和强度增加。

## 2.2 21世纪全球气候变化的总体趋势

将未来100年有关气候变化的预测结果总结如下: (1)全球地表平均温度将上升1.1–6.4℃(IPCC, 2007), 高纬度地区增温比低纬度地区明显(吴榜华等, 1997), 全球气候带将向极地方向发生一定程度的位移, 春季转暖提前而秋季变冷推迟。(2)全球降水量总体上呈增加的趋势, 但降水分布格局将发生改变, 总体向北移; 北半球中高纬度地区降水量增加, 但由于蒸散作用所损失的水分远大于降水的增加量, 中纬度内陆地区的夏季干旱明显增加(彭少麟等, 2002)。(3)全球平均海平面上升0.18–0.59 m(IPCC, 2007)。(4)北半球冰川和冰盖将继续退缩; (5)极端天气气候事件的频率和强度增加(IPCC, 2007), 但不同地区出现的频率可能有差异(刘国华和傅伯杰, 2001)。

## 3 中国野生植物保护与管理现状

历史上活跃的地质运动造成了中国陆地生境复杂多样, 使得中国成为世界上重要的植物物种形成、进化和保存中心(中国植物保护战略, 2008)。中国有高等植物3万余种, 居世界第三位, 并具有物种丰富度高、特有种属多、区系起源古老等特点。但近30年来, 由于经济的高速发展和人类活动对生态环境的破坏, 中国高等植物濒危或受威胁的物种数量达3,500–4,000种, 远远高于世界平均水平(禹玉华等, 2008)。

几十年来, 中国在野生植物保护与管理工作中取得了很大成绩。在植物物种资源本底调查基础上编写了《中国植物志》、《中国物种红色名录》、《中国植物红皮书》, 制定了《国家重点保护野生植物名录》, 建立了大量植物物种信息数据库(中国植物保护战略, 2008)。在自然保护区建设和就地保护有效性评价方面开展了一系列研究工作(苑虎等, 2009; 张殷波等, 2014), 建立自然保护区2,697处, 占中国陆地面积的14.77%(2013年中国环境状况公报), 此外还建立了森林公园2,948处、各类保护小区5万余个(国家林业局, 2013), 初步形成了比较完善的野生植物就地保护网络。

然而, 我国野生植物保护与管理也存在很多问题: (1)在人类活动和全球气候变化的双重作用下, 中国总体生态环境仍然很脆弱, 一些对全球气候变化高度敏感的植物多样性关键地区没有得到重点保护或保护质量不高; (2)气候变化将引起物种多样性分布格局改变, 同时一些物种在自然保护区的分布也将改变, 使得原有自然保护区无论从数量、规模还是功能设计上都需要有一定的调整; (3)保护资金短缺、技术设备和保护管理方法落后, 一些在全球气候变暖的条件下潜在的受威胁物种得不到及时和有效的保护; (4)气候变化敏感地区植物及其多样性的科研力度不够, 对气候变化的影响以及野生植物适应气候变化的能力认识不足; (5)对气候变化对已保护野生植物生存状况影响的长期监测与保护效果评价还十分薄弱; (6)在全球气候变化、野生植物生境破碎化加剧、物种快速消失的背景下, 简单的就地保护已不能满足珍稀濒危植物的保护需求。

随着全球气候变化成为国际植物学界关注的热点, 2006年4月国际植物园专家汇集在西班牙的大加那列岛, 就全球植物园应对全球气候变化的对策和行动计划进行了全面讨论。会议起草了《大加那列岛宣言2——气候变化与植物保护》, 制定了全球植物园应对气候变化的迁地保护策略框架。现有研究表明, 在全球气候变化的影响下, 至2080年, 欧洲将有50%以上的植物物种受到威胁, 同时60%以上的高山物种面临灭绝(Thuiller *et al.*, 2005)。非洲大陆形势同样严峻。研究显示, 至2100年, 气候变化将导致现有50%的物种濒临灭绝。尽管如此, 中国现有的植物多样性保护和管理措施已明显跟不上全球气候变化的步伐。

## 4 全球气候变暖对野生植物的影响

### 4.1 气候带北移、两极冰山退缩, 植物向高纬度地区迁移

当气候逐渐变暖, 气候带的地理位置将会发生重大的迁移。根据模型预测, 全球气候变暖将使气候带向地球的两极移动, 按现阶段全球变暖的速度, 纬度每10年向北移1°, 现在的南亚热带将被热带所替代, 依此类推, 现在的中亚热带将变成南亚热带(Seidel *et al.*, 2008)。在未来年均气温增加4℃、降水量增加20%的情景下, 中国各植被带将比现在

更干热,森林带干旱加剧,但仍能满足其水分要求,草原带将变干热,西部草原将成为荒漠,森林和草原面积锐减,荒漠带沙漠化程度加剧,青藏高原各植被带的干旱程度均呈较大幅度增加的趋势,沙漠化加剧(周广胜等, 2004)。

全球气候变暖将使一些物种不得不迁移到更为寒冷和湿润的地方。目前大量研究和观察表明,气候变化已经改变了物种的分布格局,许多物种向高纬度或高海拔地区迁移(Parmesan & Yohe, 2003; Walther *et al.*, 2005; Colwell *et al.*, 2008)。Walther等(2007)研究了棕榈(*Trachycarpus fortunei*)的分布动态,发现这一物种向北迁移与冬季气温和生长季长度的变化相关,并认为棕榈科植物是一类重要的全球变暖的生物指示物。Lucht等(2006)运用全球植被动态模型LPJ(Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model)预测了未来森林分布的变化,主要表现为在高纬度地区向北扩展,而中纬度地区则变化不明显。据分析,温度每增加1℃,就会使陆地物种的忍受极限向极地转移125 km,或在山地垂直高度上上升150 m(许再富, 1998)。Chen等(2011)对近1,400个物种进行全面调查后发现,全球变暖正在驱使动植物远离赤道地区向两极迁移。过去10年间,动植物向极地地区平均移动了16.9 km(Chen *et al.*, 2011),物种向两极移动的平均速度比2003年科学家预计的速度快3倍(Parmesan & Yohe, 2003)。除了温度等环境因子外,物种的迁移还取决于物种本身的适应能力、迁移能力、迁移过程中的障碍、可供迁移的适宜地距离等许多因素。例如,尽管恩氏云杉(*Picea engelmanni*)的种子小,可借风力传播,但无障碍时估计也仅可迁移1–20 km/100年。可见,如果没有人为的帮助,许多物种的再分布可能跟不上气候变化,因此生态系统的结构和功能可能发生较大的改变(许再富, 1998)。

许多北极植物种类也开始向高纬度迁移,逐渐形成新的植物群落。通过分析挪威斯瓦尔巴群岛上9种不同的开花植物4,000多个样本的DNA序列,Alsos等(2007)发现它们绝大部分是由来自诸如俄罗斯东北部、格陵兰岛等北极区域的植物种子远程传播而来的,且很可能是在北极强风暴、浮冰、浮木以及鸟类的综合影响下广泛散布开来。该研究暗示着历史上在北极附近地区,植物可以根据气候的变化大范围地改变分布区域,从而对全球变暖产生

适应性。而孢粉证据反映的冰后期植物由南向北传播,实际上更多的是由于冰川退缩后当地植物的繁殖体逐渐萌发和定居的结果(Miller *et al.*, 2008; Liu & Yin, 2013)。随着全球气温的升高,极地地带性植被类型苔原的分布区整体向北迁移(彭少麟等, 2002)。但北冰洋的阻挡导致北半球苔原的北界延伸受到很大限制,而南界则将大幅度向北移。Elmendorf等(2012)调查了从俄罗斯西伯利亚到芬兰的大片北极苔原带现状,发现在过去的30–40年间,苔原带的一些地区已经长出了高大的树木,局部形成了森林,证明森林带已经向北极地区扩散。在加拿大和阿拉斯加的最北部分以及西伯利亚和斯堪的纳维亚的西北部,植被结构和物种组成已经改变(Adams, 2007)。在南极半岛的西面,自20世纪40年代以来,温度上升了2.6℃,导致两种维管植物南极发草(*Deschampsia antarctica*)和南极漆姑草(*Colobanthus quitensis*)的种群大暴发(Adams, 2007)。

#### 4.2 植物向高海拔山地移动

高山生态系统的植物对气候变化尤为敏感。研究表明,高海拔地区增温速率及幅度远大于低海拔地区(Pepin & Seidel, 2005)。全球升温将加速高山冰川消融,导致山地积雪与冰川面积快速退缩及雪线上升(陈建国等, 2011; IPCC, 2007)。关于气候变暖造成低地或低海拔的植物物种向高海拔地区扩展的现象已有大量报道(Walther *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2011)。维多利亚阿尔卑斯境内的Hotham山峰上的树线已经在近些年上升了40 m。瑞士Storssnase山的高山白桦(*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*)在过去的一个世纪内向上迁移了75 m(Crawford, 2008)。欧洲高山植物平均每10年向高海拔推进1–4 m,欧洲和新西兰树线向更高海拔上升,阿拉斯加极地灌木植被也向其他生境扩张,这些都与全球气候变暖密切相关(Walther *et al.*, 2002)。2000–2009年欧盟10个成员国的研究人员在世界五大洲范围内的17座山脉区域选择了60处观测地点,筛选出764个植物种类作为研究对象,发现全球气候变暖对山区植物种类的变迁具有明显的影响,所观测的植物种类随时间推移一直发生着变化(Gottfried *et al.*, 2012)。基于青藏高原近几十年来气候变化的趋势,结合目前世界上主要大气环流模型(Global Circulation Models, GCMs)给出的CO<sub>2</sub>倍增后的气候变化结果,石培礼

(1999)推测未来气候变化情景下, 青藏高原亚高山树线分布高度变动的幅度为150–600 m, 树线上升的幅度自东向西逐渐降低。

从单个物种来看, 不同物种向更高海拔迁移的速度各不相同。一些仅在高山生存的物种迁移较快, 而在低地生存的植物迁移速度相对较慢。不同植物功能类群对气候变化的响应模式也不同(Stewart *et al.*, 2010): 生命周期较短、物种更新频率相对较高的草本植物迁移较快, 而木本植物的迁移速度和扩展速度相对滞后(Liu & Yin, 2013)。不同物种迁移速度不同, 意味着气候变化正在把高山物种的种间关系打乱, 使整个高山生态环境的构成和功能发生变化, 这可能导致一些物种走向灭绝。

气候变暖还将导致适宜生境的丧失和破碎化, 从而引起高山植物灭绝或被其他物种取代(陈建国等, 2011; Klanderud & Totland, 2008)。Pauli等(2012)发现, 欧洲南部山脉地区大量物种的数量在过去10年里正在逐步减少, 在地中海地区14个山脉顶部, 有8个地区的物种数量正在递减。随着许多物种向高海拔迁移, 一些物种将由于分布区逐渐缩小而最终灭绝(曹福祥等, 2008; Pauli *et al.*, 2012)。此外, 高山植物种类在迁移过程中, 必然面对原生植物的激烈竞争, 或自身衰落或使原生植物种类退化消失, 进而引起高山植物多样性的大幅度降低(Gottfried *et al.*, 2012)。

#### 4.3 海平面上升, 海滨植物大面积萎缩、生物入侵加剧

海滨生态系统是承受全球气候变化引起的海平面上升等影响最为前沿的缓冲带(Christian & Mazzilli, 2007; 邓自发等, 2010)。据最新研究报道, 如果全球变暖持续下去, 即使气温只升高2℃, 到2300年, 海平面也将比现在平均升高1.5–4 m, 最乐观的估计也是2.7 m(Schaeffer *et al.*, 2012)。还有研究表明, 由于CO<sub>2</sub>大量排放, 未来1,000年, 全球海平面至少会上升3.96 m(Gillett *et al.*, 2011)。海平面上升与海上风暴的作用相耦合, 将对海滨生态系统造成巨大影响。在美国, 21世纪海平面抬升将至少淹没正处于灭绝境地的80个物种的全部生境。根据更为极端的预测, 世界上许多岛屿将完全被淹没, 危及其上分布的所有动植物, 在周围受干扰的陆地也无法为它们找到合适的生境(许再富, 1998)。

由于受到陆相和海相的双重影响, 生长于热带

与亚热带海滨滩涂的红树林可能是全球气候变化影响的早期指示者(卢昌义等, 1995)。当海平面上升速率在9–12 cm/100年时, 红树林就会受到威胁甚至消亡(Ellison & Stoddart, 1991)。联合国环境项目报告显示, 海平面上升将对太平洋地区16个岛国的红树林造成影响, 到本世纪末, 13%的红树林将被淹没, 某些岛屿半数以上的红树林将逐步消失, 最严重的是美属萨摩亚群岛、斐济、图瓦卢和密克罗尼西亚群岛。在红树林后缘地貌和地层条件适合其生长的条件下, 红树林将大规模向陆地迁移, 否则红树林则很少向陆地演化, 最终随着海平面上升被淹没(高如峰, 2012)。但是一些红树林海岸的地貌在海平面上升时会发生改变, 如泥滩向陆地移动、沙丘消失等, 这将显著改变红树林生态系统(谭晓林和张乔民, 1997)。需要指出的是, 随着海平面的上升, 红树林分布区向陆地扩展的情况仅仅可能发生在没有障碍物阻挡的条件下, 而硬质海岸大堤的构筑可能将使红树林的生境彻底消失(韦兴平等, 2011)。在过去30年里佛罗里达州滨海地区的红树林分布区域向北部扩展了近一倍, 而其南侧的分布线则变化甚微(Cavanaugh *et al.*, 2013)。海平面上升后巨浪和风暴潮等极端灾害发生的频率和强度增加(Gilbert *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2010), 会加速植物根系周围有机质的流失, 降低外来沉积物的淤积速率, 导致植物生长和滩面淤积速度跟不上海平面上升速度, 植被结构简单、种类组成单一, 生物多样性降低(Gilman *et al.*, 2008; 邓自发等, 2010)。

随着海平面上升, 海水入侵将加剧, 海滨生境中盐度增加, 影响植物生长(邓自发等, 2010), 长时间海水淹没将导致盐沼初级生产力下降。入侵海滨生态系统的外来种比土著种更能承受生境水位和盐度的变化, 使得外来种的分布区在海平面上升的作用下扩大, 进而造成海滨植被面积减少、结构简单, 甚至彻底消亡(Perry & Atkinson, 2009)。据报道, 入侵植物互花米草(*Spartina alterniflora*)的耐盐性远高于本地种, 其庞大的克隆体系为缓解淹水胁迫提供了结构保障(Xiao *et al.*, 2010), 因此在盐沼湿地形成单优群落。Wang等(2010)预测, 按照目前的扩散趋势, 本地种海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)将最终被互花米草取代。

#### 4.4 气候变暖与种间关系

在全球气候变化的背景下, 水、热等条件发生

的变化必将打破自然生态系统内动植物种类间经过长期适应进化形成的相互关系,进一步导致生态系统内生物多样性格局发生改变,进而引起生态系统结构及功能的改变(陈建国等, 2011)。有研究表明,高山生物带内植物物种的竞争优势可能因气候变暖而减弱,造成高山特有植物种类消失(Hughes & Eastwood, 2006)。随着高山地区温度上升,土壤营养状况等环境因子将发生相应的改变,导致(Brooker, 2006),某些植物种类竞争力被削弱而某些种类竞争力得以提升,同时低海拔的物种迁往高海拔地区可能也会改变高山生物的种间关系并提高杂交发生的几率(刘洋等, 2009; 陈建国等, 2011)。近年来的许多研究证实,随着海拔的升高,在诸如强辐射、极低气温和营养贫乏等极端恶劣的环境条件下,高山冰缘带上本土植物之间的促进关系更为明显(Callaway *et al.*, 2002; Chu *et al.*, 2008)。全球范围的大量研究显示,垫状植物生活型适应于高山极端生境,可以通过改善微环境提高其他物种的存活率和丰富度(Cavieres *et al.*, 2006; Badano & Marquet, 2008)。由智利安第斯山中部垫状植物 *Azorella monantha* 营造的适宜微环境可以提高外来植物 *Taraxacum officinale* 的光合速率和叶片气孔导度,进而提高其幼苗的成活率(Cavieres *et al.*, 2005)。然而,随着全球变暖的加剧,高山地区的环境胁迫逐渐减弱,物种之间的关系也可能由相互协作转变为中性以至竞争关系(Klanderud, 2005)。

气候变暖还将改变入侵植物和昆虫的互作关系。Lu等(2013)研究了气候变暖和N沉降对空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)与莲草直胸跳甲(*Agasicles hygrophila*)互作关系的影响,结果表明气候变暖将进一步促进入侵植物向更高纬度地区扩散,但由于天敌昆虫对低温的耐受能力低于入侵植物,植物的入侵态势将加剧。另外,植物和传粉昆虫或鸟类对气候变化的响应程度存在差异,这将影响相关动植物的生长与繁殖,从而给生态系统的食物链和食物网带来深刻影响(Hülber *et al.*, 2006; 陈建国等, 2011)。

除温度和热量状况外,CO<sub>2</sub>浓度升高同样可以改变植物的竞争能力(Langley & Megonigal, 2010)。例如CO<sub>2</sub>浓度的升高可以促进C<sub>3</sub>植物的光合作用(Leakey *et al.*, 2009),还能提高C<sub>3</sub>植物光合作用速率对高温的耐受性,从而促进其快速生长,提高其

在群落中的竞争能力,这可能导致生态系统中不同植物生活型间竞争关系的改变(Wang *et al.*, 2008; Yin & Struik, 2009)。以C<sub>4</sub>植物或CAM植物为优势种的群落也许更容易被C<sub>3</sub>植物入侵(邓自发等, 2010),影响植物群落的构成并对生态系统的平衡和功能造成破坏。

#### 4.5 气候变暖与敏感植物类群

北极地区的植物多样性对气候变化非常敏感(Callaghan *et al.*, 2004)。在各环境因子中,北极地区夏季温度与植物多样性的关系最密切(Young, 1971)。Callaghan等(2004)预测,在苔原带的北部地区以及极地荒漠区域,植物的分布主要受夏季温度和生长季长度的限制,因此随着气候变暖,北极地区植物种类组成最主要的变化将发生在这些地区。不同植物类群对气候变化的响应不同。北方植被带约有40%是维管束植物,但这些植物目前还不能广泛地分布在北极地区,而是主要分布在接近树线的区域或者亚北极地区和北极地区之间的河流地带(Callaghan *et al.*, 2004)。如果全球温度继续增加,这些植物将向北扩大分布区并增加其丰富度,进而将成为北极地区的优势种。大部分隐花植物(如藓类植物、苔类植物、地衣以及藻类植物)目前已经广泛分布于整个北极地区(Matveyeva & Chernov, 2000),这类植物会最终在变化的气候中生存下来,但丰富度将会很低(Callaghan *et al.*, 2004)。

在北极气候变暖的情况下,最脆弱的物种可能是北极地区的特有种类(如极地柳(*Salix polaris*))和亚北极种类,主要分布在苔原带的最北端地区和极地荒漠区域。当一些南方种类侵入到高纬度地区简单的生态系统后,一些目前广泛分布于北极高纬度地区的特有种的生态位幅度将减小,丰富度也会随之下降。Heide-Jørgensen和Johnsen(1998)的研究表明, *Ranunculus sabinei* 目前仅仅分布在格陵兰岛北部狭窄的海岸边缘地带,预示着在格陵兰岛可能有一些物种濒临灭绝。另外,具有特殊结构(如保温结构)的植物如北极罂粟(*Papaver radicatum*)、极北虎耳草(*Saxifraga hyperborea*)和水母雪兔子(*Saussurea medusa*)等,有着适应极端寒旱或高山冰缘极端环境的特殊机制(杨扬和孙航, 2006; 王雪英等, 2008),环境温度的升高可能对其繁殖造成影响。

热带雨林是地球表面动植物种类最丰富、结构最复杂的植物群落,同时也是全球气候变化的高度



敏感区。热带植物除受到气温影响之外, 还受到降雨、日照等多种环境因子的影响, 其特征相对于温带植物物候更加复杂多变(Zhao *et al.*, 2013)。有研究指出, 气候变暖正迫使热带动植物向更高海拔地区迁移, 而低地雨林将没有替代物种来填补空白。Colwell等(2008)在哥斯达黎加一处长满热带雨林的死火山山坡上收集了2,000种动植物样本, 数据分析表明这些动植物中的1/2生存于狭窄的海拔范围内, 向高海拔迁徙600 m将使它们迁到一个完全陌生的生境。同时, 由于大部分热带山地森林因人类砍伐而片断化, 造成许多动植物根本无法迁徙而面临威胁, 而热带低地在动植物迁走后面临没有替代动植物迁入的局面。Kissling等(2012)指出, 现今热带地区所发现的棕榈科植物的组成在很大程度上形成于数百万年前, 在过去的10–30万年间, 严重的干燥气候影响导致非洲热带雨林面积大大减少, 许多热带地区的物种已经在大陆上完全消失。随着气候的变暖, 广阔的亚马逊雨林最深处的树种结构也发生了显著改变(Laurance *et al.*, 2004)。Laurance等(2004)对巴西境内亚马逊雨林18处从未受到人类活动直接破坏的树种结构进行了长达20多年的研究, 通过记录115个树种的生长状况发现, 其中27个树种数量显著增加, 而另外15个树种数量不断减少, 树种数量变化的速度比预计的高14倍; 而数量增加的树种均属于生长速度快的高大乔木, 数量减少的都是矮小的灌木。这种变化将使亚马逊雨林生态系统吸收CO<sub>2</sub>的能力大为降低。还有报道指出, 气候变暖可能导致植被发生变化, 在2100年气温将升高5–8℃, 降雨减少15–20%的情景下, 亚马逊雨林将转变为热带草原, 而如果政府采取行动应对全球变暖, 亚马逊地区的气温将只升高3–5℃, 降雨减少5–15%, 热带雨林不会消失(Marengo *et al.*, 2009)。

附生植物是一类生活在植物活体或其残体上但不从宿主载体吸收营养与水分等特殊植物, 机体所需全部营养和水分均来源于空气或降水, 对气候变化高度敏感; 而非维管附生植物因缺乏根系和蜡质表皮, 对极端气候条件的变化很可能比维管附生植物更敏感和脆弱(宋亮和刘耀文, 2011)。随着全球范围内的升温, 伴随雾天的减少以及大雾海拔的升高, 干旱加剧成为适于生长在阴凉湿润生境中的附生苔藓和地衣的主要威胁(宋亮和刘耀文, 2011)。

Song等(2012)对哀牢山山地森林非维管附生植物对气候变化的响应进行了研究, 发现在西南地区严重的干旱事件中, 附生苔藓波叶金枝藓(*Trismegistia undulate*)和小叶鞭苔(*Bazzania ovistipula*)大量枯萎, 年生长率分别为–5.9%和–5.4%。温度升高还对附生植物的新陈代谢、物候节律等有不同程度的影响。研究发现, 在27℃时, 文心兰(*Psychomorphis pusilla*)对生长和繁殖的投入最高; 当温度升高3℃后, 其总生物量降低、花粉柱长度变短(Vaz *et al.*, 2004)。目前分布在热带低地的苔藓和地衣几乎处于生理能力的极限, 即使很小的增温都可能让它们无法生存(Zotz & Bader, 2009)。

亦有研究发现苔藓植物对大气成分(如CO<sub>2</sub>)浓度的变化非常敏感(吴玉环等, 2002; 杨琳璐等, 2012), 大气CO<sub>2</sub>浓度增加引起的温室效应显著影响了苔藓地衣类隐花植物的生态分布。Gigna等(1998)的预测是, 在全球CO<sub>2</sub>浓度倍增条件下, 加拿大Mackenzie流域的沼泽苔藓分布有向北推移的趋势。温室气体含量增加导致荷兰自1980以来气温平均每年增加0.3℃, 自1979年始每隔5年检测的结果发现, 荷兰Utrecht地区附生地衣组成中喜温种由95种增加到172种, 适应寒冷环境的物种逐步减少或消失, 50%的高寒种出现衰退(van Herk *et al.*, 2002)。

#### 4.6 早春温度提前升高, 植物物候节律改变

植物物候节律受气候因素的强烈影响, 同时植物生活史也与温度和降水密切相关(葛全胜等, 2007)。世界范围内越来越多的研究表明, 随着全球气候变暖, 植物物候正在发生变化(方修琦和余卫红, 2002)。有研究发现, 欧洲地区早春气温每升高1℃, 植物生长季提早约7 d, 年均温升高1℃, 生长季长度延长5 d (Chmielewski & Rötzer, 2001)。欧洲国际物候观测园1959–1996年间的资料表明, 欧洲植物春季物候期提前了6.3 d, 秋季物候期推迟了4.5 d, 生长季延长10.8 d (Menzel, 2000)。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)资料显示, 在过去20年内, 欧亚地区植物生长季延长了18 d左右, 北美延长了12 d (Zhou *et al.*, 2001; 徐雨晴等, 2004)。

全球变暖影响着植物的开花物候, 并且这种影响在高山生态系统和极地地区尤为突出(陈建国等, 2011)。开花时间变化是植物受气候变化影响的一个信号, 由于温度升高及融雪提前引起的春季提前,

进而导致植物开花和结果时间提前,是最显著的物候变化(Walther *et al.*, 2002)。早花植物相比于晚花植物而言,其开花季节对于气候变暖的响应更快(Miller-Rushing & Inouye, 2009)。Fitter和Fitter(2002)对英国南部的中心地区进行了47年的研究,发现植物开花时间尤其是春季开花的植物对气温变化非常敏感。研究还表明,近10年来,385种植物开花时间比之前40年提前4.5 d,其中16%的植物开花时间在20世纪90年代比之前明显提前约15 d,仅有10种植物(占3%)的开花时间推迟;其中虫媒植物比风媒植物倾向于早开花,一年生植物比同一种属的多年生植物更倾向于早开花,这些差异会影响植物群落结构及物种间的基因交流(Fitter & Fitter, 2002)。Zhao等(2013)对植物园内热带引种植物的物候对气候变化的响应进行了研究,研究结果显示,67%的热带引种植物在1973–1999年表现出显著的物候变化趋势,在雾凉季展叶的植物更容易出现平均1.4 d/年的展叶期推迟,这主要与雾凉季最高温度的上升和日照时数的减少有关;由于气温的上升,33%的植物的生长季出现了平均3.5 d/年的显著延长;由于雨季的日照时数显著下降,24%的雨季开花的植物花期出现平均2.1 d/年缩短的趋势。植物不同器官对全球变暖的敏感度不同。Wolkovich等(2012)进行了涵盖四大洲共1,634个物种的植物生命周期研究,发现植物开花的速度是实验预测速度的8.5倍,而展叶的速度相当于预测速度的4倍,证明以往的实验低估了物种因温度上升而加快生长的进度。

#### 4.7 荒漠草原区土壤增温对植物的影响

随着全球气温升高,土壤温度也呈现出增高的趋势(Song *et al.*, 2013)。土壤干旱化加重了草地土壤侵蚀和肥力降低,潜在荒漠化趋势增大。据报道,内蒙古高原西部荒漠带与草原带的分界线及荒漠草原亚带与典型草原亚带的分界线(北段)近20年均东移大约100 km左右,移动速度为平均3–5 km/年(刘江, 2001)。荒漠草原为草原中最早生的类型,由于温度升高引起地表蒸发量加剧,将会对荒漠草原区植物产生不利影响。李晓兵等(2002)分析了中国北方荒漠草原植被分布区气候的年际和季节变化及对植被的影响,结果表明增温加剧了土壤干旱化,降水和土壤含水量是制约本区植被生长的根本原因。刘钦普和林振山(2005)研究了在全球变暖条件下美国新墨西哥州中部Sevilleta荒漠–草原生态

过渡带中引起2种共存优势植物种格兰马草(*Bouteloua gracilis*)和刺果垂穗草(*B. eripoda*)历年种群密度、组合形式和变化趋势发生变化的主要气候因子,发现最低温度和最高温度在影响种群密度变化的生态过程中起着重要的作用,气候变暖将导致来自荒漠地区的优势种刺果垂穗草在荒漠–草原群落过渡带中逐渐处于强优势地位,而荒漠草原将有可能替代生态过渡带。由于温度的上升,荒漠草原地区土壤中的氮会以气体的形式大量流失,从而导致生长在荒漠里的植物越来越少,这将给本来植物就稀疏的荒漠草原区生态环境构成严重威胁。在温度升高2℃,降水增加20%的情景下,如果不考虑草原类型的空间迁移,各类草原减产幅度差别很大,其中荒漠草原减产最剧烈,高达17.1%;若计入各类型空间分布的变化,各类草原减少约30%(周广胜等, 2004)。Century土壤–植物生态系统模型(century plant-soil ecosystem model)模拟表明,大针茅(*Stipa grandis*)草原和羊草(*Leymus chinensis*)草原的初级生产力与土壤有机质含量在气候变化的影响下显著下降,其中羊草草原比大针茅草原对气候变化更为敏感(肖向明等, 1996)。

#### 4.8 旱涝急转弯对湿地植物的影响

气候变暖导致极端性气候发生的频率大幅提高。2011年长江中下游旱涝急转便是全球气候变化下局部地区出现气候典型的典型(封国林等, 2012)。水位是影响湿地植物生长、繁殖、群落组成、物种多样性及群落结构的重要生态因子(Geest *et al.*, 2005)。往年长江中下游在入夏之前进入雨季,之后缓慢进入汛期。而在2011年直到5月末,流域内仍未见大范围降雨,进入6月后流域内连续出现4次强降雨。春季长时间干旱导致鄱阳湖、洞庭湖、洪湖等主要湖泊水面积和湖滨的面积减小,使得水温 and 盐度都上升,富营养化更易于发生,同时陆生生态系统内移,沉水植物和挺水植物的分布向湖心方向扩展,对早春植物的生长和繁殖造成了十分不利的影响。夏季强降雨带来的洪水又对干旱过后幸存的湿地植物造成严重的水淹胁迫(罗文泊等, 2007)。植物根系缺氧是洪水带来的主要不利影响之一(Voesenek *et al.*, 2004),洪水可造成土壤氧化还原电位急剧下降,使植物根部环境的氧需求增加(van Wijk *et al.*, 1992)。水淹条件下土壤厌氧微生物活动加剧,产生芳香族化合物、有机酸、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$



等有害物质,对植物根系造成毒害作用(罗文泊等, 2007)。有研究指出,干旱或干涸会导致沉水植物剧减甚至许多沉水植物大量死亡(Mitsch & Gosselink, 2000)。长时间水淹或洪水可导致沉水植物、浮叶植物甚至某些挺水植物的种群密度和生物量大幅降低,造成湿地生态系统大量物种死亡,影响种群更新和恢复,改变植被组成和结构(Vretare *et al.*, 2001; Macek *et al.*, 2006; Asaeda & Hung, 2007)。短时间内干旱到洪涝的剧烈变化改变了湿地生物赖以生存的水文条件,造成湿地生物多样性大规模衰退甚至消失,严重破坏湿地生态系统结构,并且湿地环境和水文条件重建后,生态系统食物网恢复的过程十分漫长。

## 5 全球气候变暖影响野生植物的总体趋势

### 5.1 气候变化与全球生态系统敏感度

到2100年,气候变化将导致全球陆地表面49%的植物群落以及全球陆地生态系统37%的生物区系发生改变(Bergengren *et al.*, 2011)。卫星地图显示,北半球北方针叶林群落将有90–100%发生改变,这预示着陆地景观会经历一个重大转折,将从森林生态系统转变为草原,或从草地生态系统转变为荒漠(Bergengren *et al.*, 2011)。但中东、中亚、中国大陆地区、印度尼西亚以及印度南部生态系统的变化相对较小。地球生物圈平衡被打破以及日益增加的生态压力,导致动植物面临着更加激烈的生存竞争。陆地景观的改变将迫使人类与其他动物必须适应经常迁移。

### 5.2 气候变暖影响植物多样性

最新研究表明,如果现在不作应对气候变化的努力,到2100年气候变暖将严重影响全球植物多样性。在无任何减排努力、全球升温4℃的最悲观模型中,全球植物多样性的平均水平将下降9.4%;但在假设《哥本哈根协议》得以严格执行、到2100年全球升温1.8℃的最乐观模型中,全球植物多样性预计将与目前状况无明显变化(Sommer *et al.*, 2010)。气候变暖将对各气候带的植物多样性造成不同程度的影响,温带和北极许多地区则会为更多的植物物种提供生存空间,而亚热带和热带大部分地区植物多样性水平可能明显下降。虽然发达国家在工业化时期长期大量排放温室气体,但预计植物多样性受益地区大多是这些国家,而那些对气候变暖

责任较小的发展中国家反而可能遭受重大损失(Sommer *et al.*, 2010)。

### 5.3 “气候槽”(sink areas)让某些植物迁移无路

当动植物迁徙至较高纬度或较高海拔地区时,会受到地理环境制约,有时会陷入“气候槽”,迁移中将面对海岸线或其他地理屏障,迫使它们无处可去。全球存在许多“气候槽”,包括墨西哥湾北部、亚得里亚海北部,由于后方都是温度趋于上升的地区,这里的物种迁移无路(Burrows *et al.*, 2014)。“气候槽”地区物种将面临着灭绝危机,除非它们能够适应气候变化。某些地区较长的“气候停滞时期”,意味着气候变化速度较慢,这些地区特有物种分布较密集,将成为物种遗传基因和进化避难所。

### 5.4 植物物种灭绝加剧

作为全球气候变暖对植物的极端影响,物种灭绝的速度及可能性将远高于以往。这是由于下一世纪全球气温升高的速度(0.3℃/10年)将是过去10万年中最快的(吴榜华等, 1997),而许多植物物种对气候变化耐受性的进化速率远远慢于气候变化速率,它们在对气候变化的适应方面具有很强的保守性。沿纬度方向向极地迁移的种,若在迁移途中遇到大的自然地理障碍阻隔而无路可退时将面临灭亡。物种面对气候变暖的另一条逃生路线是向高海拔山地迁移。但是因为山顶面积比山基面积小,物种越向上移动,面对的环境和遗传压力越大,当物种迁到山顶再迁移无路时,只能被更耐低温的种所取代而灭绝。气候变化还将导致本地植物物种面临外来种的竞争压力,竞争力弱的本地种很可能灭绝。

### 5.5 植物物候节律的改变引发生态紊乱

尽管不同物种对气候变化的响应不尽相同,但大量生物物候期变化的证据都表明,随着近年气温的升高,植物生长季延长、春季物候期提前、秋季物候期推迟已成为一种全球趋势(方修琦和余卫红, 2002; 徐雨晴等, 2014)。物候期的提前或延迟,可能引起其他物种的入侵和群落组成与结构的变化,这种变化正在造成生态紊乱。生长季的延长可能对植物生长发育比较有利,但是花期的缩短可能降低传粉成功率,从而威胁到植物的繁殖(Zhao *et al.*, 2013)。Memmott等(2007)表明,当植物花期提前1–3周时,17–50%的传粉者将经历食物短缺甚至无食物阶段,并且该比例还会随花期更多的提前而进一步增加,甚至导致该生态系统内的某些传粉者减少甚

至消失。一旦植物的传粉者消失,其通过有性繁殖产生的子代数将急剧减少,并最终导致植物群落衰退。这些植物对气候变化作出的响应可能会给食物链和生态系统带来毁灭性的连锁效应。

## 6 应对全球气候变化、加强野生植物保护与管理的策略

目前地球上生物物种的灭绝速率比自然过程加快约1,000倍。在当今全球气候变暖、人口与经济持续发展的大背景下,对野生植物实施保护和管理的压力越来越大。目前国内对野生植物的系统保护规划主要是静态的,很少考虑未来气候变化的影响,今后应从以下几个方面推动我国野生植物资源的保护与管理:

### 6.1 确定对全球气候变化敏感的植物多样性关键区

由于全球气候变化的影响,一些具有很高的物种丰富度和特有种数量的生态系统正逐渐退化甚至消失。因此要根据生境丧失对物种威胁的程度,研究确立对全球气候变化敏感的植物多样性关键区,并将这些地区作为就地保护的重要地区优先规划,如高寒地区(青藏高原、青海可可西里地区)、具有异质生境的特殊山区(横断山脉、浙-闽-赣交界山地、伊犁-西段天山山地)、热带雨林(滇南西双版纳地区)、岛屿(海南岛中南部山地地区、台湾中央山脉地区)、湿地(沿海滩涂湿地、通江湖泊湿地等,如黄河三角洲滨海地区、东北松嫩-三江平原、长江中下游湖区)、重要地理屏障的边缘(如大陆边缘地区的海岸带),这些地区将来可能成为保护植物多样性最大化的地区。

### 6.2 重点关注对气候变化敏感的植物类群,编制相应清单

确定优先保护的野生植物,弄清在全球气候变暖的条件下潜在的受威胁物种。对植物物种进行敏感度分析,包括物种对环境因子的耐受力、物种的生殖潜力、传播能力以及物种过去的分布变化等,以找出对气候变化最敏感或最早有反应的物种作为优先保护的物种。包括:对极端条件敏感的植物,如附生植物(如苔藓、地衣、蕨类和兰科植物的许多种类)和早春植物(如生活在干旱区的早春喜雨型短命植物、通江湖泊湿地洪水泛滥前完成生活史的植物);对气候变化的生理响应弱的植物类群;特殊生境植物(如盐沼植物、荒漠植物、高寒草甸植物、极

地植物、热带植物);共生或共进化重要类群;无路可迁徙的植物类群(适宜生长在高山山顶冰缘带、低地岛、大陆的高纬度地区和边缘地区如苔原的最北端、极地荒漠地区和海岸带的植物);狭域分布类群;散布能力弱及长寿植物类群;生态系统功能和初级生产力的关键类群以及人类直接价值(如药用野生植物)和潜在价值类群。

### 6.3 应加强气候要素改变野生植物-动物互作关系的研究

植物物候和传粉者活动的变化,入侵植物与天敌昆虫之间互作关系的改变,以及鸟类迁徙及其植物食物供给之间的关系,都表明气候变暖可能导致动植物之间相互作用的脱节。随着全球变暖趋势的蔓延,平均温度、降水量及温度和降水的分布格局的改变都会影响甚至强化植物和动物的这些相互作用,这将给群落结构和生态系统功能带来不可预见的影响。因此需加强温度、降雨等气候要素对野生植物-动物互作关系影响的研究,如模拟预测水媒传粉植物(某些沉水植物)、虫媒传粉植物(兰科植物)、外来入侵植物、早春植物等与动物之间的相互关系对气候变化的响应,避免孤立地看待某个物种的变化及其在生态系统中的功能。

### 6.4 在自然保护区和野外定位站要增加全球气候变化与植物保护的内容

传统的野生植物保护是通过对野生植物的分布中心进行围封,尽量避免人为干扰以维护物种与生境的现状。近30年来,气候变化极大地影响了我国植物多样性的分布格局以及自然保护区内野生植物分布范围和丰度,甚至导致一些物种绝灭。自然保护区在野生植物管理目标和战略中需要考虑气候变化的影响和物种对气候变化的适应,包括:(1)在建立新的自然保护区时,在保护区位置选择、保护区面积、区域划分、功能设计等问题上要重点考虑全球气候变化的影响,如气候变化引发的动植物长距离迁移所需的迁移扩张空间,以免造成保护区空白或所保护物种在迁移中由于生境丧失而灭绝;在自然保护区周围划分和恢复缓冲区,加强非保护区物种保护及其应对气候变化的能力;(2)由于一些物种迁移时会受到物理屏障的影响,需要人为帮助,包括人工进行繁殖体传播和授粉,水生生物的迁移,建立长距离迁移物种的通道,消除物种迁移的障碍等;(3)确立迁地保护作为保证野生植物保

护安全的核心作用和地位, 发展野生植物迁地保护的保育技术及信息网络, 帮助物种适应气候变化; (4) 建立植物多样性适应气候变化的监测方法, 部署野外监测计划, 加强对保护区野生植物分布和种群变化的追踪监测, 长期监测和评价气候变化对植物多样性的影响, 建立与气候变化对野生动植物及其生境影响的相关数据库; (5) 发展有关野生植物对全球气候变化响应的量化指标及相应模型。

### 6.5 将全球气候变化下野生植物保护与管理列入研究项目指南

气候变化对于野生植物多样性的影响在短期内无法恢复, 有的甚至是不可逆的。全球气候变化下的野生植物保护与管理是一个正在开展也是需要投入更多努力的课题, 实施野生植物资源的有效保护和管理, 也是在保护国家可持续发展的战略资源。因此, 应将全球气候变化下野生植物保护与管理列入国家级和省部级基金会研究项目指南, 确立应对气候变化的优先研究方向, 例如: (1) 植物多样性特征、变化过程及其响应气候变化的机制研究, 为应对气候变化提供理论基础; (2) 濒危植物生理生态应答与气候要素的耦合关系研究, 揭示物种濒危灭绝的机制, 增强对气候变化对生物资源影响的认识; (3) 加强迁地保育方法的研究, 确保迁地保育物种在居群水平的最大遗传多样性; (4) 以植物分布格局及生物学特征为基础, 制定生物多样性迁移廊道的计划; (5) 启动应对全球气候变化, 加强野生植物保护的国家林业局战略研究项目等等。

总之, 未来的工作重点是将全球气候变化的思想融入到野生植物保护机制中, 制定植物多样性保护的长期和应急计划, 从长远角度来维护野生植物资源及其生境, 以达到对生物多样性的可持续发展保护。

### 参考文献

Adams J (2007) *Vegetation–Climate Interaction: How Vegetation Makes the Global Environment*. Praxis Publishing Ltd., Chichester.

Alsos IG, Eidesen PB, Ehrich D, Skrede I, Westergaard K, Jacobsen GH, Landvik JY, Taberlet P, Brochmann C (2007) Frequent long-distance plant colonization in the changing Arctic. *Science*, **316**, 1606–1609.

Asaeda T, Hung LQ (2007) Internal heterogeneity of ramet and flower densities of *Typha angustifolia* near the boundary of the stand. *Wetlands Ecology and Management*, **15**, 155–164.

Badano EI, Marquet PA (2008) Ecosystem engineering affects

ecosystem functioning in high-Andean landscapes. *Oecologia*, **155**, 821–829.

Bergengren JC, Waliser DE, Yung YL (2011) Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*, **107**, 433–457.

Brikowski TH, Lotan Y, Pearle MS (2008) Climate-related increase in the prevalence of urolithiasis in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **105**, 9841–9846.

Brooker RW (2006) Plant–plant interactions and environmental change. *New Phytologist*, **171**, 271–284.

Burrows MT, Schoeman DS, Richardson AJ, Molinos JG, Hoffmann A, Buckley LB, Moore PJ, Brown CJ, Bruno JF, Duarte CM, Halpern BS, Hoegh-Guldberg O, Kappel CV, Kiessling W, O'Connor MI, Pandolfi JM, Parmesan C, Sydeman W, Ferrier S, Williams KJ, Poloczanska ES (2014) Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature*, **507**, 492–495.

Callaghan TV, Björn LO, Chernov Y, Chapin T, Christensen TR, Huntley B, Ims RA, Johansson M, Jolly D, Jonasson S, Matveyeva N, Panikov N, Oechel W, Shaver G, Elster J, Henttonen H, Laine K, Taulavuori K, Taulavuori E, Zöckler C (translated by He YT (何永涛)) (2004) Biodiversity, distributions and adaptations of Arctic species in the context of environmental change. *AMBIO* (人类环境杂志), **33**, 380–393. (in Chinese)

Callaway RM, Brooker RW, Choler P, Kikvidze Z, Lortie CJ, Michalet R, Paolini L, Pugnaire FI, Newingham B, Aschehoug ET, Armas C, Kikodze D, Cook BJ (2002) Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature*, **417**, 844–848.

Cao FX (曹福祥), Xu QJ (徐庆军), Cao SJ (曹受金), Long JX (龙绛雪), Qi CJ (祁承经) (2008) Advances of global warming impact on species distribution. *Journal of Central South University of Forestry and Technology* (中南林业科技大学学报), **28**, 86–89. (in Chinese with English abstract)

Cavanaugh KC, Kellner JR, Forde AJ, Gruner DS, Parker JD, Rodriguez W, Feller IC (2013) Poleward expansion of mangroves is a threshold response to decreased frequency of extreme cold events. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **111**, 723–727.

Cavieres LA, Badano EI, Sierra-Almeida A, Gómez-González S, Molina-Montenegro MA (2006) Positive interactions between alpine plant species and the nurse cushion plant *Laretia acaulis* do not increase with elevation in the Andes of central Chile. *New Phytologist*, **169**, 59–69.

Cavieres LA, Quiroz CL, Molina-Montenegro MA, Muñoz AA, Pauchard A (2005) Nurse effect of the native cushion plant *Azorella monantha* on the invasive non-native *Taraxacum officinale* in the high-Andes of central Chile. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **7**, 217–226.

Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, **333**, 1024–1026.

Chen JG (陈建国), Yang Y (杨扬), Sun H (孙航) (2011) Ad-

- vances in the studies of responses of alpine plants to global warming. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), **17**, 435–446. (in Chinese with English abstract)
- Chmielewski FM, Rötzer T (2001) Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, **108**, 101–112.
- Christian RR, Mazzilli S (2007) Defining the coast and sentinel ecosystems for coastal observations of global change. *Hydrobiologia*, **577**, 55–70.
- Chu CJ, Maestre FT, Xiao S, Weiner J, Wang YS, Duan ZH, Wang G (2008) Balance between facilitation and resource competition determines biomass–density relationships in plant populations. *Ecology Letters*, **11**, 1189–1197.
- Colwell RK, Brehm G, Cardelús CL, Gilman AC, Longino JT (2008) Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, **322**, 258–261.
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**, 184–187.
- Crawford RMM (2008) *Plants at the Margin: Ecological Limits and Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Deng ZF (邓自发), Ouuyang Y (欧阳琰), Xie XL (谢晓玲), Qing H (清华), Xiao Y (肖燕), An SQ (安树青) (2010) The effects of primary process of global change on biological invasion in coastal ecosystem. *Biodiversity Science* (生物多样性), **18**, 605–614. (in Chinese with English abstract)
- Ellison JE, Stoddart DR (1991) Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research*, **7**, 151–165.
- Elmendorf SC, Henry GHR, Hollister RD, Björk RG, Boulanger-Lapointe N, Cooper EJ, Cornelissen JHC, Day TA, Dorrepaal E, Elumeeva TG, Gill M, Gould WA, Jónsdóttir IS, Jorgenson JC, Klanderud K, Klein JA, Koh S, Kudo G, Lara M, Lévesque E, Magnússon B, May JL, Mercado-Díaz JA, Michelsen A, Molau U, Myers-Smith IH, Oberbauer SF, Onipchenko VG, Rixen C, Schmidt NM, Shaver GR, Spasojevic MJ, Þórhallsdóttir ÞE, Tolvanen A, Troxler T, Tweedie CE, Villareal S, Wahren H, Walker X, Webber PJ, Welker JM, Wipf S (2012) Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming. *Nature Climate Change*, **2**, 453–457.
- Fang XQ (方修琦), Yu WH (余卫红) (2002) Progress in the studies on the phenological responding to global warming. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **17**, 714–719. (in Chinese with English abstract)
- Feng GL (封国林), Yang HW (杨涵洵), Zhang SX (张世轩), Wang K (王阔), Shen BZ (沈柏竹) (2012) A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), **36**, 1009–1026. (in Chinese with English abstract)
- Fitter AH, Fitter RSR (2002) Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, **296**, 1689–1691.
- Gao RF (高如峰) (2012) The influence of sea level rise to coastal ecological environment in China. *Science and Technology Information* (科技资讯), (25), 181–183. (in Chinese)
- Ge QS (葛全胜), Wang F (王芳), Chen PQ (陈泮勤), Tian YY (田砚宇), Cheng BB (程邦波) (2007) Review on global change research. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **22**, 417–427. (in Chinese with English abstract)
- Gilbert G, Brown AF, Wotton SR (2010) Current dynamics and predicted vulnerability to sea-level rise of a threatened Bittern *Botaurus stellaris* population. *Ibis*, **152**, 580–589.
- Gillett NP, Arora VK, Zickfeld K, Marshall SJ, Merryfield WJ (2011) Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, **4**, 83–87.
- Gilman EL, Ellison J, Duke NC, Field C (2008) Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. *Aquatic Botany*, **89**, 237–250.
- Gottfried M, Pauli H, Futschik A, Akhalkatsi M, Barančok P, Alonso JLB, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado MRF, Kazakis G, Krajči J, Larsson P, Mallaun M, Michelsen O, Moiseev D, Moiseev P, Molau Ulf, Merzouki A, Nagy L, Nakhutsrishvili G, Pedersen B, Pelino G, Puscas M, Rossi G, Stanisci A, Theurillat J-P, Tomaselli M, Villar L, Vittoz P, Vogiatzakis I, Grabherr G (2012) Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, **2**, 111–115.
- Heide-Jørgensen HS, Johnsen I (1998) *Ecosystem Vulnerability to Climate Change in Greenland and the Faroe Islands*. Ministry of Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen.
- Hülber K, Gottfried M, Pauli H, Reiter K, Winkler M, Grabherr G (2006) Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Central Alps: implications for climate warming. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **38**, 99–103.
- Hughes C, Eastwood R (2006) Island radiation on a continental scale: exceptional rates of plant diversification after uplift of the Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **103**, 10334–10339.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kissling WD, Eiserhardt WL, Baker WJ, Borchsenius F, Couvreur TL, Balslev H, Svenning JC (2012) Cenozoic imprints on the phylogenetic structure of palm species assemblages worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **109**, 7379–7384.
- Klanderud K (2005) Climate change effects on species interactions in an alpine plant community. *Journal of Ecology*, **93**, 127–137.
- Klanderud K, Totland Ø (2008) Diversity–stability relation-

- ships of an alpine plant community under simulated environmental change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **44**, 679–684.
- Langley JA, Megonigal JP (2010) Ecosystem response to elevated CO<sub>2</sub> levels limited by nitrogen-induced plant species shift. *Nature*, **466**, 96–99.
- Laurance WF, Oliveira AA, Laurance SG, Condit R, Nascimento HE, Sanchez-Thorin AC, Lovejoy TE, Andrade A, D'Angelo S, Ribeiro JE, Dick CW (2004) Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. *Nature*, **428**, 171–175.
- Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP, Ort DR (2009) Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, **60**, 2859–2876.
- Li KR (李克让) (1996) Research progress of global climate change and its impact and future prospect. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **51**, 1–14. (in Chinese with English abstract)
- Li XB (李晓兵), Chen YH (陈云浩), Zhang YX (张云霞), Fan YD (范一大), Zhou T (周涛), Xie F (谢锋) (2002) Impact of climate change on desert steppe in northern China. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **17**, 254–261. (in Chinese with English abstract)
- Liu CM (刘昌明), Liu XM (刘小莽), Zheng HX (郑红星) (2008) The issue of impacts of climate change on hydrology and water resources. *Impact of Science on Society* (科学对社会的影响), (2), 21–27. (in Chinese)
- Liu GH (刘国华), Fu BJ (傅伯杰) (2001) Effect of global change on forest ecology system. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), **16**, 71–77. (in Chinese with English abstract)
- Liu HY, Yin T (2013) Response of forest distribution to past climate change: an insight into future predictions. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 4426–4436.
- Liu QP (刘钦普), Lin ZS (林振山) (2005) Gray analysis on responses of desert/grassland biome transition zone to global warming—a case of the desert/grassland biome transition zone in New Mexico. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **24**, 756–762. (in Chinese with English abstract)
- Liu J (刘江) (2001) *Study on the Strategy of Sustainable Development of China* (中国可持续发展战略研究). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Liu Y (刘洋), Zhang J (张健), Yang WQ (杨万勤) (2009) Responses of alpine biodiversity to climate change. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 88–96. (in Chinese with English abstract)
- Lu CY (卢昌义), Lin P (林鹏), Ye Y (叶勇), Wang HH (汪和海) (1995) Review on impact of global climate change on mangrove ecosystems and research countermeasure. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **10**, 341–347. (in Chinese with English abstract)
- Lu XM, Siemann E, Shao X, Wei H, Ding JQ (2013) Climate warming affects biological invasions by shifting interactions of plants and herbivores. *Global Change Biology*, **19**, 2339–2347.
- Lucht W, Schaphoff S, Erbrecht T, Heyder U, Cramer W (2006) Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change. *Carbon Balance and Management*, **1**, 6.
- Luo WB (罗文泊), Xie YH (谢永宏), Song FB (宋凤斌) (2007) Survival strategies of wetland plants in flooding environments. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **26**, 1478–1485. (in Chinese with English abstract)
- Macek P, Rejmánková E, Houdková K (2006) The effect of long-term submergence on functional properties of *Eleocharis cellulose* Torr. *Aquatic Botany*, **84**, 251–258.
- Marengo J, Nobre CA, Betts RA, Cox PM, Sampaio G, Salazar L (2009) Global warming and climate change in Amazonia: climate-vegetation feedback and impacts on water resources. In: *Amazonia and Global Change*, pp. 273–292. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Matveyeva N, Chernov Y (2000) Biodiversity of terrestrial ecosystems. In: *The Arctic Environment, People, Policy* (eds Nuttall M, Callaghan TV), pp. 233–274. Harwood Academic Publishers, Amsterdam.
- Memmott J, Graze PG, Waser NM, Price MV (2007) Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology Letters*, **10**, 710–717.
- Menzel A (2000) Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, **44**, 76–81.
- Miller PA, Giesecke T, Hickler T, Bradshaw RH, Smith B, Seppä H, Valdes PJ, Sykes MT (2008) Exploring climatic and biotic controls on Holocene vegetation change in Fennoscandia. *Journal of Ecology*, **96**, 247–259.
- Miller-Rushing AJ, Inouye DW (2009) Variation in the impact of climate change on flowering phenology and abundance: an examination of two pairs of closely related wildflower species. *American Journal of Botany*, **96**, 1821–1829.
- Mitsch WJ, Gosselink JG (2000) *Wetlands*. Wiley, New York.
- Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, Abdaladze O, Akhalkatsi M, Alonso JLB, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado RF, Ghosn D, Holten JJ, Kanka R, Kazakis G, Kollár J, Larsson P, Moiseev P, Moiseev D, Molau U, Mesa JM, Nagy L, Pelino G, Puşcaş M, Rossi G, Stanisci A, Syverhuset AO, Theurillat J-P, Tomaselli M, Unterluggauer P, Villar L, Vittoz P, Grabherr G (2012) Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, **336**, 353–355.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421**, 37–42.
- Peng SL (彭少麟), Li QF (李勤奋), Ren H (任海) (2002) Impact of climate change on wildlife. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **22**, 1153–1159. (in Chinese with English abstract)
- Pepin NC, Seidel DJ (2005) A global comparison of surface and free-air temperatures at high elevations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110**, doi: 10.1029/

- 2004JD005047.
- Perry JE, Atkinson RB (2009) York river tidal marshes. *Journal of Coastal Research*, **57**, 39–42.
- Qin DH (秦大河), Luo Y (罗勇) (2008) The cause and the change trend in the future of global climate change. *Impact of Science on Society* (科学对社会的影响), (2), 16–21. (in Chinese)
- Qu JS (曲建升), Ge QS (葛全胜), Zhang XQ (张雪芹) (2008) Development and comparison of the significations of global change and its correlated concepts. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **23**, 1277–1284. (in Chinese with English abstract)
- Schaeffer M, Hare W, Rahmstorf S, Vermeer M (2012) Long-term sea-level rise implied by 1.5°C and 2°C warming levels. *Nature Climate Change*, **2**, 867–870.
- Seidel DJ, Fu Q, Randel WJ, Reichler TJ (2008) Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, **1**, 21–24.
- Shi PL (石培礼) (1999) *A Study on the Vegetation Ecology of Subalpine Timberline Ecotone* (亚高山林线生态交错带的植被生态学). PhD dissertation, Commission for Integrated Survey of Natural Resource, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Smith JM, Cialone MA, Wamsley TV, McAlpin TO (2010) Potential impact of sea level rise on coastal surges in south-east Louisiana. *Ocean Engineering*, **37**, 37–47.
- Sommer JH, Kreft H, Kier G, Jetz W, Mutke J, Barthlott W (2010) Projected impacts of climate change on regional capacities for global plant species richness. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **277**, 2271–2280.
- Song L (宋亮), Liu WY (刘文耀) (2011) Epiphytic plants: their responses to global change and roles in bioindication. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **30**, 145–154. (in Chinese with English abstract)
- Song L, Liu WY, Nadkarni NM (2012) Response of non-vascular epiphytes to simulated climate change in a montane moist evergreen broad-leaved forest in southwest China. *Biological Conservation*, **152**, 127–135.
- Song YT, Zhou DW, Zhang HX, Li GD, Jin YH, Li Q (2013) Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 907–912.
- Stewart JR, Lister AM, Barnes I, Dalén L (2010) Refugia revisited: individualistic responses of species in space and time. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **277**, 661–671.
- Tan XL (谭晓林), Zhang QM (张乔民) (1997) Mangrove beaches's accretion rate and effects of relative sea-level rise on mangroves in China. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), **16**, 29–35. (in Chinese with English abstract)
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **102**, 8245–8250.
- Tian HQ (田汉勤), Wan SQ (万师强), Ma KP (马克平) (2007) Global change ecology: global change and terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), **31**, 173–174. (in Chinese)
- van Geest GJ, Coops H, Roijackers RMM, Buijse AD, Scheffer M (2005) Succession of aquatic vegetation driven by reduced water-level fluctuations in floodplain lakes. *Journal of Applied Ecology*, **42**, 251–260.
- van Herk CM, Aptroot A, van Dobben HF (2002) Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. *The Lichenologist*, **34**, 141–154.
- van Wijck C, de Groot CJ, Grillas P (1992) The effect of anaerobic sediment on the growth of *Potamogeton pectinatus* L.: the role of organic matter, sulphide and ferrous iron. *Aquatic Botany*, **44**, 31–49.
- Vaz APA, Figueiredo-Ribeiro RCL, Kerbauy GB (2004) Photoperiod and temperature effects on *in vitro* growth and flowering of *P. pusilla*, an epiphytic orchid. *Plant Physiology and Biochemistry*, **42**, 411–415.
- Voesenek LACJ, Rijnders JHGM, Peeters AJM, van de Steeg HM, de Kroon H (2004) Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities. *Ecology*, **85**, 16–27.
- Vretare V, Weisner SE, Strand JA, Granéli W (2001) Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, **69**, 127–145.
- Walther GR, Berger S, Sykes MT (2005) An ecological “footprint” of climate change. *Proceedings of the Royal Society*, **272**, 1427–1432.
- Walther GR, Gritti ES, Berger S, Hickler T, Tang ZY, Sykes MT (2007) Palms tracking climate change. *Global Ecology and Biogeography*, **16**, 801–809.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389–395.
- Wang D, Heckathorn SA, Barua D, Joshi P, Hamilton EW, Lacroix JJ (2008) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the tolerance of photosynthesis to acute heat stress in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM species. *American Journal of Botany*, **95**, 165–176.
- Wang RZ, Yuan L, Zhang LQ (2010) Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on the benthic communities of salt marshes in the Yangtze estuary, China. *Ecological Engineering*, **36**, 799–806.
- Wang XY (王雪英), Zhao Q (赵琦), Jiao YX (焦雨歆) (2008) The progress on polar vascular plants. *Chinese Journal of Polar Research* (极地研究), **20**, 258–264. (in Chinese with English abstract)
- Wei XP (韦兴平), Shi F (石峰), Fan JF (樊景凤), Yang Q (杨青) (2011) Climate change impacts on marine lives and ecosystems. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), **29**, 241–252. (in Chinese with English abstract)
- Wen L, Lin CA (2003) Global climate change and its impacts. *Advances in Water Science* (水科学进展), **14**, 667–674. (in Chinese with English abstract)
- Wolkovich EM, Cook BI, Allen JM, Crimmins TM, Betancourt



- JL, Travers SE, Pau S, Regetz J, Davies TJ, Kraft NJB, Ault TR, Bolmgren K, Mazer SJ, McCabe GJ, McGill BJ, Parmesan C, Salamin N, Schwartz MD, Cleland EE (2012) Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, **485**, 494–497.
- Wu BH (吴榜华), Meng QF (孟庆繁), Zhao YG (赵元根), Liu YC (刘延春) (1997) Globe climate change and biodiversity. *Journal of Jilin Forestry University* (吉林林学院学报), **13**, 142–146. (in Chinese with English abstract)
- Wu YH (吴玉环), Cheng GD (程国栋), Gao Q (高谦) (2003) Bryophyte's ecology functions and its significances in revegetation. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), **23**, 215–220. (in Chinese with English abstract)
- Xiao XM (肖向明), Wang YF (王义凤), Chen ZZ (陈佐忠) (1996) Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia and their response to climate change. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **38**, 45–52. (in Chinese with English abstract)
- Xiao Y, Tang JB, Qing H, Yan OY, Zhao YJ, Zhou CF, An SQ (2010) Clonal integration enhances flood tolerance of *Spartina alterniflora* daughter ramets. *Aquatic Botany*, **92**, 9–13.
- Xu YQ (徐雨晴), Lu PL (陆佩玲), Yu Q (于强) (2004) Review and prospect in the researches of influence of climate change on plant phenology. *Resources Science* (资源科学), **26**, 129–136. (in Chinese with English abstract)
- Xu ZF (许再富) (1998) *Principle and Method of Conservation of Rare and Endangered Plants* (稀有濒危植物迁地保护的原理与方法). Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese)
- Xu ZF (许再富), Huang JY (黄加元), Hu HB (胡华斌), Zhou HF (周惠芳), Meng LZ (孟令曾) (2008) A commentary on plant *ex situ* conservation and its researches in China nearly thirty years. *Guihaia* (广西植物), **28**, 764–774. (in Chinese with English abstract)
- Yang LL (杨琳璐), Wang ZS (王中生), Zhou LY (周灵燕), Ma YS (马元岫), Wang ZK (王志科), Ying T (营婷), Song YY (宋圆圆), Xu WX (徐卫祥) (2012) Response and bio-indicator of bryophyte and lichen as Cryptogamae plants to environmental change. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)* (南京林业大学学报(自然科学版)), **36**, 137–143. (in Chinese with English abstract)
- Yang Y (杨扬), Sun H (孙航) (2006) Advances in the functional ecology of alpine and arctic plants. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), **28**, 43–53. (in Chinese with English abstract)
- Yin X, Struik PC (2009) C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> photosynthesis models: an overview from the perspective of crop modelling. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, **57**, 27–38.
- Young SB (1971) The vascular flora of Saint Lawrence Island, with special reference to floristic zonation in the arctic regions. In: *Contributions from the Gray Herbarium of Harvard University*, No. 201, pp. 11–115. Harvard University, Cambridge, MA.
- Yuan H (苑虎), Zhang YB (张殷波), Qin HN (覃海宁), Liu Y (刘燕), Yu M (喻梅) (2009) The *in situ* conservation of state key protected wild plants in national nature reserves in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 280–287. (in Chinese with English abstract)
- Yu YH (禹玉华), Liao JP (廖景平), Ding CH (丁朝华), Zheng YL (郑永利) (2008) Global botanic gardens and plant diversity conservation. *The Botanical Gardens of China* (中国植物园), (11), 13–24. (in Chinese)
- Zhang YB (张殷波), Zhang XL (张晓龙), Yuan H (苑虎) (2014) Assessing the *in situ* conservation status of key protected wild plants in Shanxi Province. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 167–173. (in Chinese with English abstract)
- Zhao J, Zhang Y, Song F, Xu Z, Xiao L (2013) Phenological response of tropical plants to regional climate change in Xishuangbanna, south-western China. *Journal of Tropical Ecology*, **29**, 161–172.
- Zhou GS (周广胜), Wang YH (王玉辉), Bai LP (白莉萍), Xu ZZ (许振柱), Shi RX (石瑞香), Zhou L (周莉), Yuan WP (袁文平) (2004) Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), **62**, 692–707. (in Chinese with English abstract)
- Zhou LM, Tucker CJ, Kaufmann RK, Slayback D, Shabanov NV, Myneni RB (2001) Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 20069–20083.
- Zotz G, Bader MY (2009) Epiphytic plants in a changing world global: change effects on vascular and non-vascular epiphytes. *Progress in Botany*, **70**, 147–170.

(责任编辑: 龙春林 责任编辑: 时意专)