

何远政,黄文达,赵昕,等.气候变化对植物多样性的影响研究综述[J].中国沙漠,2021,41(1):59-66.

气候变化对植物多样性的影响研究综述

何远政^{1,2}, 黄文达¹, 赵昕¹, 吕朋^{1,2}, 王怀海^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:植物多样性是生态系统结构和功能的基础,气候变化已对其产生了深刻的影响,甚至于严重威胁。植物多样性的减少或丧失必然会影响生态系统结构和功能的稳定性,导致严重的生态、经济和社会后果。植物多样性对气候变化的响应受控于气温和水分的动态平衡。本文系统总结了气候变暖和降水格局变化对植物多样性的影响,分析了气候变化对不同生态系统、群落类型、尺度范围(全球尺度、区域尺度、局地尺度)内植物多样性的影响,并归纳了差异的主要影响因素。最后对未来的研究方向做了展望。

关键词:气候变化;气候变暖;降水格局变化;植物多样性

文章编号: 1000-694X(2021)01-059-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00104

中图分类号: X176

文献标志码: A

0 引言

近百年来,全球气候一直处于不断变暖的状态。1880—2012年,全球地表平均气温大约升高了0.85℃。预计到2035年将继续上升0.3—0.7℃^[1]。与此同时,中国的气候与环境也发生了显著变化,地表年平均气温升高幅度约为0.91℃,略高于同期全球或北半球平均升幅^[1]。气候变暖会加剧全球水循环过程,引发降水分格局发生变化^[2-3]。IPCC第五次报告指出,21世纪以来,中国主要多雨带出现北移现象^[1]。气候变化不仅导致严重的经济损失,而且结合人类活动对生态系统也产生了严重的影响^[4]。

生物多样性是人类赖以生存的基础,一方面给人类提供基本的环境,另一方面提供丰富的资源。生物多样性直接影响着生态系统的稳定性和持续性。物种多样性是生物多样性的基础,物种个体不仅是承载生命现象的有机单位,而且在微观到宏观生物多样性的带谱中起到承上启下的关键作用。遗传多样性是生物多样性的核心,是物种多样性和生态系统多样性的基础^[5]。功能多样性是群落或生态系统中有机体性状值的范围和分布,能明确地反映群落物种间在资源互补利用程度上的差异,与生

态系统功能变化具有密切的关系。作为生物多样性的主要类型,植物多样性对气候变化的响应方式表现为物种灭绝、适应性进化和改变分布格局。气候变化直接或间接地改变植物-环境适应关系以及植物-植物的竞争关系。增温伴随降水的减少会改变生态系统水量平衡,限制草本植物的繁衍和定居^[6]。气温和水分动态平衡决定着植物多样性分布格局^[7-8]。物种多样性、遗传多样性和功能多样性三者之间的相互作用关系及机理是全球气候变化背景下植物多样性研究的重点。

植物多样性是生物多样性的的重要组成部分,是生命系统的基本特征。气候变化制约植物生长、分布和繁衍,驱动着植物多样性发生改变,严重威胁生物多样性^[4,6]。气候变化使生境退化或丧失,物种灭绝速度加快,物种分布范围发生变化,适宜生境改变^[9],生物物候期和物种繁殖方式发生改变^[10],群落生产力发生波动^[11-12],种间关系发生变化等^[13]。植物多样性也会有效缓解气候变化的影响。植物多样性越高,气候变化对其带来的影响就越小^[14]。因此,理解气候变化和植物多样性之间的相互作用关系,对生物多样性的保护和生态系统健康维持具有非常重要的理论和现实意义。

收稿日期:2020-04-29; 改回日期:2020-09-17

资助项目:国家自然科学基金项目(41971144); 国家重点研发计划项目(2017FY100205, 2016YFC0500-907)

作者简介:何远政(1995—),男,陕西安康人,硕士研究生,研究方向为植物生态学。E-mail: 316920690@qq.com

通信作者:黄文达(E-mail: huangwenda2008@163.com)

1 气候变化对植物多样性的影响

1.1 气候变暖对植物多样性的影响

1.1.1 对物种多样性的影响

物种多样性和群落多样性是维持生态景观多样性和稳定性的基础。气候变暖对生态系统水热动态产生显著影响,导致生态系统物种组成和群落结构发生明显变化^[15]。但由于区域、生态系统类型等不同,会呈现不同的响应方式。如在全球尺度上,地表温度的升高导致南半球植被长势呈小幅增加趋势,北半球中高纬度地区则呈大幅增加趋势^[16];在亚洲内陆地区,春、夏季气温是影响植被生长的主要环境因子^[17];多数研究表明增温会降低植物物种多样性或丰富度。如在北极苔原生态系统,短期的增温使灌木和禾草的盖度增加,却减少了植物群落物种多样性^[18];在青藏高原,增温使植物群落物种丰富度快速降低了26%—36%^[19];也有少数研究发现了与之不同的结果。如在温带草地生态系统,植物群落物种多样性对增温没有响应;在内蒙古荒漠草原,增温对植物群落物种丰富度没有影响^[20]。刘利利^[21]发现新疆温性草原植被物种丰富度与年平均气温呈峰型关系。此外,气温升高会改变物种的分布格局,物种常常通过迁移到新的栖息地或形成新的生物学特征来适应气候的变化。如有研究表明第四纪以来随着气候变暖趋势的增加,全球物种以 $16.9\text{ km}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度向高纬度和高海拔地区迁移^[20];在全球气候变化的背景下,林线的位置、物种组成、植被格局和生理生态特征都在发生变化。Kazakis等^[22]和Pickering等^[23]证明气候变暖使喜温的灌木、草本和入侵杂草的分布趋于更高的海拔;气温升高使挪威南部高山带的优势矮灌木宽叶仙女木(*Dryas octopetala*)被禾本科和非禾本科草本取代^[24];牛建明^[25]预测气候变化将会使内蒙古草原植被发生地带性迁移;唐海萍等^[26]预测在未来气候变化下东北草原区物种地理分布范围变化较大,其中灌丛对全球变化的响应最为剧烈。

1.1.2 对遗传多样性的影响

在漫长的物种进化过程中,基因与气候形成了稳定的作用关系。气候变化必然使遗传物质发生改变,进而引起遗传多样性变化。有研究认为气候变暖会使种群数量萎缩、种群间遗传物质交流中断,造成种内不断近亲交配,遗传多样性丧失^[26];姜

威^[27]利用ISSR分子标记研究发现增温降低了高寒草甸植物异针茅(*Stipa aliena*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)的种群遗传多样性;年平均气温和裸果木(*Gymnocarpos przewalskii*)的遗传参数呈显著负相关^[5];Guo等^[28]发现内蒙古地区地带性物种小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、中间锦鸡儿(*C. davazamcii*)和柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)的遗传多样性与年均气温呈显著的负相关;年平均气温和最热月平均气温是促进短花针茅(*Stipa breviflora*)遗传分化的关键热量因子^[29]。也有研究发现气温升高会增加遗传多样性,使得种群扩张,分布范围扩大。如紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)的遗传结构与最暖月平均气温呈显著正相关^[30];年平均气温和云杉(*Picea asperata*)的遗传多样性指数呈显著正相关^[31];Zhao等^[32]利用RAPD技术研究了内蒙古锡林郭勒草原大针茅(*Stipa grandis*)种群的遗传多样性与生态因子之间的相关关系,结果显示其遗传多样性和遗传距离都与年均温和最冷月平均气温呈极显著正相关;差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)种群的遗传多样性随着年均气温和最暖月平均气温的升高而增加,其中Shannon's信息指数达到显著差异^[33]。少数研究发现气候变暖对种群遗传多样性没有影响。如加拿大北美香柏(*Thuja occidentalis*)物种遗传多样性与纬度梯度没有相关性^[34]。曹路等^[35]研究发现多年生和一年生植物对增温具有不同的遗传响应,且短期增温不能使植物种群遗传多样性和遗传结构发生显著变化;野牛草(*Buchloe dactyloides*)倍性与年平均气温和暖月最高气温呈正相关,与湿季平均气温呈负相关,且基因流与年平均气温呈极显著负相关,与最暖月最高气温呈显著负相关^[36]。

1.1.3 对功能多样性的影响

气温是影响植物生长发育的关键因子。气温升高对不同植被类型的物种、种群的生长和繁殖性状都有一定的影响^[7]。在全球尺度上,气候变暖提高植物功能性状及多样性水平。如Niinemets^[37]通过收集全球范围内182个地点的558种阔叶树种和39种针叶树种的功能性状和气候间关系比较发现,气温高的地区,植物叶片较厚,单位面积的叶干物质高;Simova等^[38]等对北美乔木群落物种的研究表明气候变暖造成性状的功能空间发生改变,且木材密度性状差异随年平均气温的升高而增加;Ordóñez等^[39]发现气温升高显著影响了欧洲植物群落功能

多样性地理格局。气候变暖对区域尺度植物功能性状也产生了影响。如年平均气温是影响内蒙古草原植物功能多样性的主要因子^[12]；龚春梅等^[40]发现荒漠地区旱生植物叶子小型化,特别是科尔沁沙地 52 种植物 SLA 小于其他区域^[41],可减少高温干旱引起的蒸腾。大量研究结果指出气候变暖主要影响植物叶面积、叶氮含量和光合效率。如模拟增温增加了川西亚高山林线交错带绵穗柳(*Salix eriostachya*)比叶面积,显著降低了叶氮含量,随着气温的升高,C₄植物的叶厚增大,而 C₃植物叶厚变化规

律不明显^[42]；增温对川贝母(*Fritillaria cirrhosa*)叶绿素含量没有显著影响^[43]；冯秋红等^[44]对 11 个栎属(*Quercus*)树种的功能性状与气象因子的关系研究表明,由南向北随气温的降低,栎属树种的生长季逐渐缩短,单位叶面积和质量的光合效率升高,种子干重也在增大。也有研究发现气温变化会影响生态系统多功能性。如澳大利亚大豆属(*Glucine*)植物在气温较高的地方种子质量较大^[45]；年均温是影响青藏高原生态系统多功能性的主导因子^[46](表 1)。

表 1 气候变暖对植物多样性的影响
Table 1 Effects of climate warming on plant diversity

研究区域		植物多样性变化	文献来源
全球尺度		南半球植被长势呈小幅增加趋势,北半球中高纬度地区植被长势呈大幅增加趋势	[16]
		北极苔原生态系统灌木和禾草的盖度增加,植物群落物种多样性降低	[18]
		加拿大北美香柏(<i>Thuja occidentalis</i>)物种遗传多样性与纬度梯度没有相关性	[34]
		植物叶片较厚,单位面积的叶干物质高	[37]
		北美乔木木材密度性状差异增加	[38]
		显著影响欧洲植物群落功能多样性地理格局	[39]
		澳大利亚大豆属(<i>Glucine</i>)植物种子质量变大	[45]
区域尺度	高寒草原	植物群落物种丰富度降低 26%—36%	[19]
		降低异针茅(<i>Stipa aliena</i>)和垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)的种群遗传多样性	[27]
		增加了绵穗柳(<i>Salix eriostachya</i>)比叶面积,显著降低了叶氮含量	[42]
		川贝母(<i>Fritillaria cirrhosa</i>)叶绿素含量没有显著变化	[43]
		年均温是影响青藏高原生态系统多功能性的主导因子	[46]
	荒漠草原	植物群落物种丰富度没有显著变化	[20]
		裸果木(<i>Gymnocarpus przewalskii</i>)、小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)、中间锦鸡儿(<i>C. davazamcii</i>)和柠条锦鸡儿(<i>C. korshinskii</i>)的遗传参数与年平均气温呈显著负相关	[5,28]
		大针茅(<i>Stipa grandis</i>)、差丕嘎蒿(<i>Artemisia halodendron</i>)和野牛草(<i>Buchloe dactyloides</i>)遗传多样性和遗传距离都与年均温呈极显著正相关	[32-33,36]
		多年生和一年生植物对增温具有不同的遗传响应,且短期增温不能使植物种群遗传多样性和遗传结构发生显著变化	[35]
		旱生植物叶子小型化	[40]
	温性草原	植被物种丰富度与年平均气温呈峰型关系	[21]

1.2 降水格局变化对植物多样性的影响

1.2.1 对物种多样性的影响

从区域到全球范围,降水都深刻影响着植物群落的空间分布和时间动态^[45]。草地不同生活型植物多样性与气候变化关系密切。暖湿气候有利于多年生植物多样性的增加,而持续暖干气候会提高

一年生植物多样性^[13]。Jiao 等^[47]对欧亚大草原 1831 个样点地上生物量数据分析发现,过去 30 年(1980—2014 年)的年降雨量对该区域地上生物量影响显著。Li 等^[48]指出在暖湿气候条件下,中国内陆大部分半干旱和干旱区的植被盖度显著增加。也有研究发现降水变化对物种多样性没有影响。如 Grime 等^[49]在钙质草地以及 Harpole 等^[50]在一年生草地的

研究表明,年降水量的增加对植物多样性没有显著影响;白珍建^[51]发现增水处理对贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原物种多样性没有显著影响。大量研究数据显示降水越丰沛的地带,物种丰富度越高,年降水量作用重大。如 Cleland 等^[52]对美国草地长期观测数据分析发现,物种丰富度与年降水量呈显著正相关;这与李瑞新^[12]对内蒙古草原和锡林郭勒典型草原的研究结果一致。降水的空间变化会对植物物种分布和多样性产生影响。如在森林生态系统,树种多样性随年降水量的增加而增加,并且降水的空间变化对植物物种的分布影响很大^[53-54];Bai 等^[55]分析了内蒙古草原植被长期监测数据,发现随着年降水梯度增加,植物多样性沿荒漠—荒漠草原—典型草原—草甸草原的梯度增加,这与刘利利^[21]对新疆不同草原类型植被物种丰富度与年降水量相关性的研究结果一致。降水分配格局也会影响植物物种多样性。如生长季节的降雨次数和平均单次降雨量对植物多样性的影响远大于年降雨量^[56-57]。也有少数研究结果显示降水利用效率(RUE)是物种多样性的关键驱动因子^[58-59]。因此,降水格局变化必然会对植物多样性特征、植物群落结构产生影响,进而影响整个生态系统的结构与功能。

1.2.2 对遗传多样性的影响

降水格局变化对植物遗传多样性产生显著影响,其中年降水量和降水分配格局起主导作用,但研究结果不一致。一些研究显示降水变化对遗传多样性起促进作用。如王平^[60]利用最大熵生态位模型(MAXENT)研究发现岩风(*Libanotis buchtormensis*)的遗传多样性受降水量的年变化和1月降水量的影响显著。年降水量和云杉的基因流呈显著正相关^[31];野牛草种群倍性与年降雨量和暖季降雨量呈显著正相关^[36];Huang 等^[61-62]发现大尺度上小叶锦鸡儿和黄柳(*Salix gordejvii*)的遗传多样性与年降水量呈显著正相关。也有研究结果与之相反,如降雨量增加阻碍了科尔沁沙地差不嘎蒿种群间的基因流,导致遗传多样性降低^[33];年降水量和裸果木的遗传参数呈负相关^[5];年降雨量是限制紫斑牡丹空间遗传结构的主要因子^[30]。还有部分研究发现二者相互关系没有规律可循。如牛永梅^[63]对蒙古高原北部草原贝加尔针茅、大针茅、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、新疆针茅(*S. sareptana*)及针茅(*S. capillata*)遗传多样性进行研究发现,5种针茅遗

传多样性指标与经度和年降水量相关性不显著。但在大尺度上遗传差异却受制于经度和年降水量。

1.2.3 对功能多样性的影响

降水在很大程度上改变了群落物种功能性状的分布格局。美洲、澳洲与之相关的研究显示降水是控制北美和南美大平原禾草物种功能性状的主导控制因子,随着降雨量的升高,叶片长、株高、单位茎干叶面积、SLA、N吸收率在增加,而叶片干重、老叶片中的N含量在降低^[9]。美国新墨西哥州 Jornada Basin 实验站的长期控水试验表明,在多年平均年降水量不变的情况下,降水年际变异增加,植物功能多样性增加^[64-65]。巴拿马中部热带雨林群落林冠层的叶功能性状与降水量呈负相关^[66]。澳大利亚东南部46个研究点的多年生植物叶片宽度、比叶面积和冠层高度与降水量呈正相关^[67]。中国这方面的研究主要体现在降水对不同生态系统植物功能多样性的影响。如在草甸草原,半湿润气候下物种的比叶面积增大,提高了养分吸收能力和光合能力;在荒漠草原,由于降水较少,物种承受了较大的干旱胁迫,物种通过降低比叶面积来减少水分散失^[68]。降雨是影响黄土丘陵区^[69-70]和锡林郭勒典型草原^[12]植物功能多样性的主要环境因子。也有研究发现降水格局变化会对生态系统功能产生影响^[71]。Soliveres 等^[46]研究发现在全球亚湿润干燥区,降水格局变化直接影响物种丰富度和生态系统多功能性相互关系。Loreau 等^[72]对南美草原长期观测数据分析发现降水变异性的增加显著降低了生态系统的初级生产力。优势植物-功能类型表现出相反的反应:多年生禾草的繁殖力下降了81%,而灌木的生产力提高了67%(表2)。

1.3 气候变化对植物物种、功能和遗传多样性相互关系的影响

人们常用物种多样性来代替生物多样性的研究,但是不同物种在生理、生态、形态方面都存在一定的差异。因此简单地依赖物种多样性指标难以体现物种对生态系统功能的影响^[72]。物种多样性、遗传多样性和功能多样性是生物多样性的重要组成部分,三者的多样性水平以及气候变化对三者相互关系的影响机理是维持生态系统稳定性和生物多样性保护的关键所在。

物种多样性与功能多样性之间的关系一直以来存有争议。大多数研究发现物种多样性和功能

表 2 降水格局变化对植物多样性的影响

Table 2 Effects of precipitation pattern changes on plant diversity

研究区域	植物多样性变化	文献来源
全球尺度	物种丰富度与年降水量呈显著正相关	[52]
	年降水的增加对钙质草地和一年生草地植物多样性没有显著影响	[49–50]
	年降雨量升高,北美和南美大平原禾草物种叶片长、株高、单位茎干叶面积、SLA、N吸收率增加,叶片干重、老叶片中的N含量降低	[9]
	美国新墨西哥州模拟降水年际变异增加,植物功能多样性增加	[64–65]
	巴拿马中部热带雨林群落林冠层的叶功能性状与降水量呈现负相关	[66]
	澳大利亚东南部多年生植物叶片宽度、比叶面积和冠层高度与降水量呈正相关	[67]
	在全球亚湿润干燥区,降水格局变化影响物种丰富度和生态系统多功能性相互关系	[46]
	欧亚草原植物地上生物量受年降雨量影响显著	[47]
	降水变异性的增加显著降低了南美草原生态系统的初级生产力	[72]
区域尺度 草原	降水格局变化是影响锡林郭勒典型草原植物功能多样性的主要环境因子;物种丰富度与年降水量呈显著正相关	[12]
	年降水梯度增加,内蒙古草原植物多样性沿荒漠—荒漠草原—典型草原—草甸草原的梯度增加	[55]
	增水处理没有显著影响内蒙古草原贝加尔针茅(<i>Stipa baicalensis</i>)草原物种多样性	[51]
	新疆温性草原植被物种丰富度与年降水量呈正相关	[21]
	野牛草、小叶锦鸡儿和黄柳(<i>Salix gordejewii</i>)的遗传多样性与年降水量呈显著正相关	[36,61–62]
	降雨量增加阻碍差不嘎蒿和裸木种群间的基因流,导致遗传多样性降低	[5,33]
	内蒙古草原贝加尔针茅、大针茅、克氏针茅(<i>Stipa krylovii</i>)、新疆针茅(<i>S. sareptana</i>)及针茅(<i>S. capillata</i>)遗传多样性与经度和年降水量相关性不显著	[63]
	物种承受较大干旱胁迫,荒漠草原植物比叶面积降低	[68]
森林	树种多样性随年降水量的增加而增加;降水空间变化显著影响植物物种分布	[53–54]
	年降水量和云杉的基因流呈显著正相关	[31]

多样性之间是“S”形的逻辑关系。即在物种丰富度较低的时候,随着物种丰富度指数的增加,功能多样性先快速增加,然后增速放缓,到达一定程度后,功能多样性趋于稳定,随着物种丰富度指数的增加,功能多样性不再增加甚至降低^[73]。气候变化对物种多样性和功能多样性之间作用关系的研究也有一些报道,如Biswas等^[74]对加拿大北部不同降水格局下高山林和河岸林的物种多样性和功能多样性研究结果表明,功能多样性随着物种多样性的增加而增加;高寒草甸物种丰富度、均匀度和功能多样性指数之间存在较高的正相关性^[75];Bello等^[76]指出在不同气候梯度上物种丰富度、多样性、均匀度和功能多样性指数变化趋势一致。也有与之相反的结论,如Li等^[77]发现长期施氮使得高寒草甸植物物种多样性急剧降低,而功能多样性却没有发生改变。气候变化对物种多样性和功能多样性之间作用关系的探索,为我们理解生物多样性如何影响生态系统功能提供重要支持。

物种多样性与遗传多样性之间的关系研究主要在优势物种遗传多样性与群落物种多样性之间的相关性。有研究认为优势物种遗传多样性抑制物种多样性。如王宇坤等^[78]发现内蒙古典型草原建群种羊草的遗传多样性抑制群落物种多样性,且遗传多样性和物种多样性之间存在交互作用。也有研究发现优势物种遗传多样性可以提高群落物种多样性水平。如Wehenkel等^[79]对8个树种组成的森林树种群落的物种多样性与遗传多样性之间的相互关系研究发现群落的物种多样性与遗传多样性之间呈显著的正相关。但是气候变化对物种多样性与遗传多样性之间的作用关系研究报道较少。如Mihai等^[80]研究发现欧洲高山草地优势物种遗传多样性和群落物种多样性对第四纪冰期气候震荡反应不同步,使得两种多样性没有相关关系。Tetsukazu等^[81]指出气候变化直接或间接地影响植物的系统发育,导致物种多样性和遗传多样性迅速丧失。徐武美等^[82]发现在纬度梯度上,物种多样性

和遗传多样性变化趋势一致,具有平行效应,即与高纬度地区相比,低纬度地区具有更高的物种多样性和遗传多样性。通过对物种多样性和遗传多样性之间关系的探索,更有利于理解生物多样性与生态系统之间的关系。

功能多样性与遗传多样性之间的关系研究主要集中在土壤微生物多样性方面,气候变化对植物功能多样性与遗传多样性之间关系的影响还未见报道。

2 展望

综上所述,气候变暖以及降水格局变化对植物多样性的影响显著,但是对不同生态系统、群落类型、尺度范围(全球尺度、区域尺度、局地尺度)内植物多样性影响程度和对应的响应方式存在差异。对生态交错带影响的研究较少,联合植物群落物种多样性、遗传多样性和功能多样性分析植物多样性水平及其对生态系统结构和功能的影响研究也甚少。因此,在典型生态区域开展气候变化下群落植物多样性水平对比研究,有助于深入了解不同环境条件下植物多样性的空间分布格局及生态适应机制,对进一步了解生态系统功能和预测未来气候变化下植物多样性的地理格局具有重要意义,同时将为生物多样性保护与可持续利用提供重要支撑。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2013.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [3] Fischer E M, Beyerle U, Knutti R. Robust spatially aggregated projections of climate extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(12): 1033-1038.
- [4] 吴建国,吕佳佳,艾丽. 气候变化对生物多样性影响:脆弱性和适应[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 693-703.
- [5] 徐振明,宛涛,蔡萍,等. 裸果木种群遗传多样性特点及与地理气候因子关联研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(1): 70-76.
- [6] 牛书丽,万师强,马克平. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓[J]. *中国科学院院刊*, 2009, 24(4): 421-427.
- [7] Li X R, Jia R L, Zhang Z S, et al. Hydrological response of biological soil crusts to global warming: a ten-year simulative study[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4960-4971.
- [8] 马克平,钱迎倩. 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1994.
- [9] Oyarzabal M, Paruelo J M, del Pino F, et al. Trait differences between grass species along a climatic gradient in South and North America[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(2): 183-191.
- [10] Sherry R A, Zhou X H, Gu S L, et al. Divergence of reproductive phenology under climate Warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104: 198-202.
- [11] 王国杰,汪诗平,郝彦宾,等. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能多样性与生产力关系的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1649-1656.
- [12] 李瑞新. 内蒙古草原群落多样性格局及其与生产力的关系: 基于物种与功能性状纬度[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [13] 赵哈林,大黑俊哉,李玉霖,等. 人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响[J]. *草业学报*, 2008, 5: 1-8.
- [14] 李川川. 论气候变化背景下中国生物多样性适应性保护法律制度的完善[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [15] Kovach R, Muhlfeld C, Wade A A, et al. Genetic diversity is related to climatic variation and vulnerability in threatened bull trout[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 2510-2524.
- [16] Jia F M, Xiao Y S, Peter E T, et al. Global latitudinal-asymmetric vegetation growth trends and their driving mechanisms: 1982-2009[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(3): 1484-1497.
- [17] Anwar M, Wang X H, Xu X T, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178: 21-30.
- [18] Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, et al. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(5): 1342-1346.
- [19] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing on the Tibetan Plateau [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [20] 李元恒. 内蒙古荒漠草原植物群落结构和功能对增温和氮素添加的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [21] 刘利利. 新疆不同草地类型植物多样性及与水热因子的关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [22] Kazakis G, Ghosn D, Vogiatzakis I N, et al. Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Lefka Ori, Crete[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16: 1603-1615.
- [23] Pickering C, Hill W, Green K. Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Snowy Mountains [J]. *Australia Biodiversity and Conservation*, 2008, 17: 1627-1644.
- [24] Klanderud K, Birks H J B. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants[J]. *The Holocene*, 2003, 13: 1-6.
- [25] 牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究[J]. *草地学报*, 2001, 9(4): 277-279.
- [26] 唐海萍,陈旭东,张新时. 中国东北样带生物群落及其对全球气候变化响应的初步探讨[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 428-433.

- [27] 姜威. 增温与放牧对高寒草甸异针茅和垂穗披碱草种群遗传多样性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [28] Guo H Y, Gao Y B, Ma C C, et al. Genetic diversity and genetic relationship of *Caraganamicrophylla*, *C. davazamcii* and *C. korshinskii* on the Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 729–736.
- [29] 张庆. 内蒙古短花针茅草原生物多样性格局及环境解释[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [30] 袁军辉. 环境生态因子对野生紫斑牡丹空间遗传结构形成的影响[J]. *广东农业科学*, 2014, 7: 48–52.
- [31] 郑舒文. 几种云杉遗传多样性及其对环境适应性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [32] Zhao N X, Gao Y B, Wang J L, et al. RAPD diversity of *Stipa grandis* populations and its relationship with some ecological factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1312–1319.
- [33] Huang W D, Zhao X Y, Zhao X, et al. Relationship between the genetic diversity of *Artemisia halodendron* and climatic factors[J]. *Acta Oecologica*, 2014, 55: 97–103.
- [34] 徐怀同. 气候、干扰、森林演替对北美香柏遗传多样性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [35] 曹路, 李春瑞, 田青松, 等. 内蒙古荒漠草原植物遗传多样性对模拟增温处理的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6909–6918.
- [36] 陈科. 野牛草种质资源遗传多样性及其与地理气候因子相关性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- [37] Niinemets U. Global-scale climatic controls of leaf dry mass per area, density, and thickness in trees and shrubs [J]. *Ecology*, 2001, 82(2): 453–469.
- [38] Simova I, Violle C, Kraft N J B, et al. Shifts in trait means and variances in North American tree assemblages: species richness patterns are loosely related to the functional space[J]. *Ecography*, 2015, 38(7): 649–658.
- [39] Ordóñez A, Svenning J C. Geographic patterns in functional diversity deficits are linked to glacial-interglacial climate stability and accessibility[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(7): 826–837.
- [40] 龚春梅, 白娟, 梁宗锁. 植物功能形状对全球气候变化的指示作用研究[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(11): 2355–2363.
- [41] 赵红洋, 李玉霖, 王新源, 等. 科尔沁沙地 52 种植物叶片性状变异特征研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1292–1298.
- [42] 徐振锋, 胡庭兴, 张力, 等. 模拟增温对川西亚高山林线交错带锦穗柳生长、叶物候和叶性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 7–12.
- [43] 黎开强. 川产贝母属植物遗传多样性及温光对川贝母生长发育的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2009.
- [44] 冯秋红, 史作民, 董莉莉, 等. 南北样带温带区栎属树种功能性状间的关系及其对气象因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2010, 30(6): 619–627.
- [45] Murray B R, Thrall P H, Gill A M, et al. How plant life-history and ecological traits relate to species rarity and commonness at varying spatial scales [J]. *Austral Ecology*, 2002, 27(3): 291–310.
- [46] Soliveres S, Maestre F T, Eldridge D J, et al. Plant diversity and ecosystem multifunctionality peak at intermediate levels of woody cover in global drylands[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2015, 23(12): 1408–1416.
- [47] Jiao C, Yu G, He N. Spatial pattern of grassland aboveground biomass and its environmental controls in the Eurasian steppe [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(1): 3–22.
- [48] Li J Y, Xu W X, Cheng Z G, et al. Spatial-temporal changes of climate and vegetation cover in the semi-arid and arid regions of China during 1982–2006 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 268–272.
- [49] Grime J P, Fridley J D, Askew A P, et al. Long-term resistance to simulated climate change in an infertile grassland [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(29): 10028–10032.
- [50] Harpole W S, Potts D L, Suding K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2341–2348.
- [51] 白珍建. 增水增氮对草甸草原植物群落结构组成和功能的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [52] Cleland E E, Collins S L, Dickson T L, et al. Sensitivity of grassland plant community composition to spatial vs. temporal variation in precipitation[J]. *Ecology*, 2013, 94(8): 1687–1696.
- [53] Williams J W, Webb T, Richard P H, et al. Late Quaternary biomes of Canada and the eastern United States [J]. *Journal of Biogeography*, 2000, 27(3): 585–607.
- [54] 杨小林. 西藏色季拉山林线森林群落结构与植物多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [55] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau[J]. *Ecology*, 2008, 89(8): 2140–2153.
- [56] Swemmer A M, Knapp A K, Snyman H A. Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(4): 780–788.
- [57] 张蕊, 赵学勇, 左小安, 等. 荒漠草原沙生针茅群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(2): 1–8.
- [58] Hawkins B A, Field R, Cornell H V, et al. Energy, water and broad-scale geographic patterns of species richness[J]. *Ecology*, 2003, 84(12): 3105–3117.
- [59] Jyoti B. The Inner Mongolia grassland productivity and biodiversity response to grazing and precipitation[D]. Beijing, China: China Agricultural University, 2015.
- [60] 王平. 岩风的遗传多样性与谱系地理学研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [61] Huang W D, Zhao X Y, Zhao X, et al. Environmental determinants of genetic diversity in *Salix gordejewii* (Salicaceae) in three Sandy Lands, northern China[J]. *Acta Oecologica*, 2018, 92: 67–74.
- [62] Huang W D, Zhao X Y, Zhao X, et al. Environmental determi-

- nants of genetic diversity in *Caragana microphylla* (Fabaceae) in northern China[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2016, 181: 269–278.
- [63] 牛永梅. 蒙古高原北部光芒组针茅种群沿经向方向的遗传分化[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.
- [64] Osem Y, Perevolotsky A, Kigel J. Site productivity and plant size explain the response of annual species to grazing exclusion in a Mediterranean semi-arid rangeland[J]. Journal of Ecology, 2004, 92(2): 297–309.
- [65] Mwendera E J, Saleem M A N, Woldu Z. Vegetation response to cattle grazing in the Ethiopian highlands[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1997, 64(1): 43–51.
- [66] Condit R, Ashton P, Bunyavejchewin S, et al. The importance of demographic niches to tree diversity[J]. Science, 2006, 313(5783): 98–101.
- [67] Fonseca C R, Overton J M C, Collins B, et al. Shifts in trait-combinations along rainfall and phosphorus gradients[J]. Journal of Ecology, 2000, 88(6): 964–977.
- [68] 燕亚媛. 古气候和现代气候对内蒙古草原功能多样性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [69] 施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6805–6814.
- [70] 施宇, 温仲明, 龚时慧, 等. 黄土丘陵区植物功能性状沿气候梯度的变化规律[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 107–111.
- [71] Gherardi L A, Sala O E. Enhanced precipitation variability decreases grass-and increases shrub-productivity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(41): 12735–12740.
- [72] Loreau M. Biodiversity and ecosystem functioning: a mechanistic model[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1998, 95(10): 5632–5636.
- [73] 李慧, 李妍汶, 王海洋, 等. 重庆市主城区不同生境条件下植物功能群多样性研究[J]. 林业调查规划, 2017, 42(2): 139–145.
- [74] Biswas S R, Mallik A U. Species diversity and functional diversity relationship varies with disturbance intensity[J]. Ecosphere, 2011, 2(4): 991–1009.
- [75] 宋非凡. 群落系统发育多样性和功能性状多样性对青藏高原高寒草甸植物群落生产力的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [76] Bello F D, Lep J, Sebastia M T. Variation in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradient[J]. Ecography, 2006, 29(6): 801–810.
- [77] Li W, Cheng J M, Yu K L, et al. Plant functional diversity can be independent of species diversity: observation based on the impact of 4-yr of nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow[J]. Plos One, 2015, 10(8): e0136040.
- [78] 王宇坤, 丁新峰, 王小平, 等. 内蒙古典型草原建群种羊草基因型多样性抑制群落物种多样性的生态功能[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1–10.
- [79] Wehenkel C, Bergmann F, Gregorius H R. Is there a trade-off between species diversity and genetic diversity in forest tree communities?[J]. Plant Ecology, 2006, 185: 151–161.
- [80] Mihai P, Pierre T, Philippe C. No positive correlation between species and genetic diversity in European alpine grasslands dominated by *Carex curvula* [J]. Diversity and Distributions, 2008, 14: 852–861.
- [81] Tetsukazu Y, Donoghue M, Hendry A. Direct and indirect impacts of climatic change on species diversity and genetic diversity[J]. Earth and Environmental Science, 2009, 6: 302003.
- [82] 徐武美, 慈秀芹, 李捷. 浅析环境特征对遗传多样性与物种多样性的平行效应[J]. 生物多样性, 2017, 25(5): 481–489.

Review on the impact of climate change on plant diversity

He Yuanzheng^{1,2}, Huang Wenda¹, Zhao Xin¹, Lv Peng^{1,2}, Wang Huaihai^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Plant diversity is the basis for ecosystem structure and function, and climate change has had a profound impact on it, even a serious threat. The decrease or loss of plant diversity necessarily affects the stability of ecosystem structure and function, lead to serious ecological, economic and social consequences. Studies have shown that the response of plant diversity to climate change is controlled by the dynamic balance of temperature and water. This research systematically introduced the effects of climate warming and precipitation pattern change on plant diversity. In this report, the impacts of climate change on plant diversity in different ecosystems, community types and scales (global, regional and local scale) are analyzed and the main factors that influence the difference were summarized. We also propose research hotspots and directions for future plant diversity research in different environmental conditions.

Key words: climate change; climate warming; precipitation pattern change; plant diversity