DOI: 10.5846/stxb201612222638
王芳,熊喆, 延晓冬, 戴新刚,王磊斌,李亚飞.杨属物种多样性在中国的地理分布格局.生态学报,2018,38(1):282-290.
Wang F, Xiong Z, Yan X D, Dai X G, Wang L B, Li Y F.Geographical distribution pattern of species diversity of the genus *Populus* L. in China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):282-290.

杨属物种多样性在中国的地理分布格局

王 芳[1,2],熊 喆[1,*], 延晓冬[3], 戴新刚[1],王磊斌[3],李亚飞[3]
1 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室,北京 100029
2 中国科学院大学,北京 100049
3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100087

摘要:利用地理信息系统技术与空间统计相结合的方法,研究了杨属物种多样性在中国区域尺度上的空间分布格局,并且采用线性回归分析方法研究了杨属物种多样性与经纬度的关系。结果表明:(1)杨属物种在中国呈带状分布,东西分布幅度大于南北分布幅度;(2)纬度梯度上杨属物种集中分布区位于 30—40°N,经度梯度上位于 110—120°E,说明杨属物种多样性格局在经、纬度梯度上并非单调递增或递减,而是在某一最适区域具有最高的物种多样性;(3)中国杨属物种多样性的分布中心集中于东北—西南方向的黑河-腾冲线两侧,从黑腾线向西北和东南方向延伸过程中,物种多样性逐渐降低;沿黑腾线从东北向西南方向物种多样性呈增加趋势;(4)从分组、分种检索上看,白杨组和青杨组物种在中国分布范围最广,山杨、小叶杨、响叶杨和青杨 4 种物种分布范围最广,可见同一类群中不同分类等级的植物多样性地理分布格局存在差异。

关键词:地理分布格局; 分布中心; 物种多样性; 杨属

Geographical distribution pattern of species diversity of the genus *Populus* L. in China

WANG Fang[1,2], XIONG Zhe[1,*], YAN Xiaodong[3], DAI Xingang[1], WANG Leibin[3], LI Yafei[3]
1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing* 100087, *China*

Abstract: The geographical distribution of the species diversity of the genus *Populus* in China was studied using the geographical information system and spatial statistics. The relationship between the *Populus* species diversity and longitudinal and latitudinal bands was analyzed using linear regression analysis. The results showed that: (1) In China, the genus *Populus* exhibited a zonal distribution that was in an east-west direction, which was wider than that in the north-south direction; (2) The greatest species diversity of the *Populus* distribution on the latitudinal and longitude gradient was located in the latitudinal and longitudinal bands of 30—40°N and 110—120°E, respectively, indicating that species richness was the greatest where the longitude and latitude were optimized and decreased as the longitude and latitude moved above or below the optimal range; (3) The distribution center of the *Populus* species biodiversity in China was located on both sides of the Heihe-Tengchong line in the northeast-southwest direction, and species diversity increased from the northeast to southwest of China along the line, but decreased from this line to the northwest and the southeast; (4) In terms of the level of taxonomy, the sections of *Populus* with the most extensive distribution range were sect. *Populus* and sect. *Tacamahaca*

基金项目:国家自然科学基金项目(91425304, 91525101)
收稿日期:2016-12-22; **修订日期**:2017-09-27
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xzh@ tea.ac.cn

Spach in China and the four species with the most extensive distribution ranges were *Populus davidiana* Dode, *Populus simonii Carr*, *Populus adenopoda* Maxim, and *Populus cathayana* Rehd, which revealed that the differing levels of taxonomy within the same taxa resulted in a varied species diversity pattern on the same scale.

Key Words: distribution pattern; distribution center; species diversity; genus *Populus*

物种分布的研究一直是生态学与生物地理学领域关注的焦点,研究物种地理分布是了解物种多样性现状(包括受威胁现状)、特有程度、形成、演化及适应机制及预测未来物种分布的基础[1],而上述信息又是判断生物多样性热点和进行优先保护的重要依据[2],因此了解物种的地理分布格局能够为制定有效的生物多样性保护计划提供数据支持和理论依据。

物种多样性的大尺度格局分布特征是物种空间分布最显著的特征之一,不同物种类群、不同地理环境下多样性格局都呈现出巨大的空间差异[3-5]。研究者普遍认为物种分布格局可能与空间尺度的特征和物种分类等级有关,不同分布范围的物种丰富度具有显著差异,尤其在纬度梯度上物种多样性组成差异较大[6-8]。研究表明物种多样性从低纬度到高纬度地区普遍呈递减趋势,全球物种多样性中心集中于热带,尤其是降雨充足且均匀的低地。其中,多样性最丰富的地区在南美西北部的森林,乔木和藤本物种最丰富地区在亚马逊上游,非木本植物丰富度最大地区位于安第斯山脉和美洲中南部。但物种多样性在纬度梯度的变化规律是空间因子系统作用的结果,具有一定复杂性[1,9]。因此,不同类群的物种可能具有特有的多样性分布格局。如全球栎属多样性中心在 25°N 的东南亚地区和墨西哥地区,中国栎属多样性中心在中国南部和西南部山区[10]。对中国物种多样性格局的研究表明中国植物多样性的分布是不均匀的,种子植物主要集中分布于中南部,约在 20°—35°N 之间。其中横断山脉地区 、华中地区和岭南地区植物多样性和特有性较高[11-12]。中国木本植物的物种多样性呈现明显的纬度梯度,由南向北逐渐降低;同时,物种多样性的分布格局与中国的地形特征具有良好的对应关系,物种多样性较高的地区多集中在山区[5]。对中国物种大尺度分布的研究大多数集中于局地群落物种多样性格局,如对青藏高原、伊犁河谷、伏牛山等具有特殊地形的局地群落尺度物种多样性格局的研究[13-16]。

物种多样性是构成生物多样性的基础,也是衡量生物多样性最常用的指标,一般用物种数量(即物种丰富度)和种内个体相对多度(即物种多度)来度量[17-19]。本文即采用物种数量(丰富度)来表示物种多样性。根据研究对象或目的不同,空间格局的尺度使用全球、区域、局地和生态系统或者定量化的面积等概念来表示[20-21]。根据生物多样性的内涵[22-23],本文从生物地理学范畴来进行大尺度格局的物种多样性研究。

杨属物种多样性高,分布广泛,除澳大利亚和新西兰外,物种几乎遍及全球。其中,在温带和亚北极地区的物种数量要远远多于南美洲和非洲南部地区[24-26]。在中国,杨属物种几遍全国,从寒温带针叶林区到亚热带常绿阔叶林区,即使热带雨林区也产少量物种,从森林草原到干旱荒漠区均有杨属物种生长[27]。据《中国植物志》记载中国有 62 种杨属物种[28],董士林等统计中国有天然杨属物种 53 种[29],方精云等统计中国有 88 种(含变种)[30]。由于不同研究者按照不同的分类等级统计或者所参考的标本来源不同,可能出现物种数量不同的结果。本研究主要利用 1905—2008 年间采集于中国各地 9000 多条杨属物种标本记录与已发表文献中的新物种记录进行统计分析,为研究杨属物种在中国的多样性分布格局提供了充分条件。

同时,杨属在中国的工业发展和环境保护中起着重要作用。据统计,2015 年中国杨属物种总面积达 9972600hm^2,其中原生种 1434300hm^2,栽培种 8538300hm^2;5122980hm^{2}用于工业原料,3497160hm^{2}用于环境保护[27]。目前,在人口增长和工农业迅速发展的压力下,有必要开展杨属在中国区域尺度上物种多样性空间格局的研究。

1　数据来源

杨属物种信息来自中国最大的数字植物标本信息共享平台—中国数字植物标本馆(http://www.cvh.ac.

http://www.ecologica.cn

cn/)。所有标本信息进行过校对后[28-38],建立杨属物种数据集和分类表。

中国大陆杨属物种数量共计 88 种(其中包括栽培种和天然杂交种,变种和变型计入原种),分为 5 组(表 1),其中除欧洲大叶杨(*P. canescens* Aiton)外均为中国本土物种。

表 1 中国杨属物种分组组成

Table 1 The sections of Genus *Populus* in China

组别 Sections	物种数量 Number of species	组别 Sections	物种数量 Number of species
白杨组 *Sect.* Populus	13	黑杨组 Sect.Aigeiros Duby	11
大叶杨组 *Sect. Leucoides* Spach	11	胡杨组 Sect.Turanga Bge	2
青杨组 *Sect. Tacamahaca* Spach	51	合计 Total	88

2 研究方法

2.1 物种分布图的绘制

本文以中国行政区划单位为基础来对中国杨属物种进行统计分析。分别从市级和县级行政尺度上进行,按照全国 361 个市和 2854 个县(国家统计局 2014 年数据)统计每个市、县域内杨属物种数量。其中,标本采集地覆盖 1694 个县。(没有标本记录的县可能是没有杨属物种生长或没有采集到,也可能是采集时没有到过该县。利用尽可能多年的标本数据就是根据重复采样原理,实现在大尺度地理格局上尽可能减少物种遗漏。)

2.2 物种丰富度统计方法

根据杨属物种数据集中记录的每个物种所在县,计算县级尺度上物种丰富度时,筛选各县所有物种记录,去掉重复物种记录使每个物种在各县具有唯一性,然后计算各县所有物种数量;计算市级尺度上物种丰富度时,取各市所辖县内物种的并集,计算物种数量。

计算每隔 10°经、纬度带内物种丰富度时,首先计算出各县中心经纬度,分别统计哪些县中心经、纬度落在该经、纬度带内,取这些县内所有杨属物种的并集,计算物种数量,以此来表示该经、纬度带内杨属物种丰富度。

由于黑河-腾冲连线的地带不仅如胡焕庸早年提出的—是一条人口分布的东西分界线[39],而且是一条生态环境界线,在表征自然环境演变方面也具有十分重要的意义[40]。在研究杨属物种的地理分布时发现杨属物种其中一个集中分布带大致位于该界线两侧。为了方便理解,引入黑河-腾冲线,计算每种物种与黑河-腾冲线间的距离(Z),用度(°)表示:

$$Z=-0.882403912x+y+61.63922145 \quad (1)$$

式中,y 表示纬度,x 表示经度,Z 表示黑腾线西北和东南两侧带状区域距黑腾线的距离,用度(°)表示。

以黑河-腾冲线为对称中心,统计每隔 10°带内的杨属物种数量,表示在东北—西南方向上沿黑河-腾冲一线不同分布带杨属物种多样性格局变化趋势。

2.3 线性回归分析

在了解黑腾线两侧每 10 度带物种多样性分布格局的基础上,进一步深入研究杨属物种多样性格局与黑腾线的关系。对在黑河-腾冲方向上每隔 1°带内物种数量(S)和距黑河-腾冲线的距离(Z)进行一元线性回归,确定杨属物种数量与距黑河-腾冲线距离的关系,根据黑河-腾冲线与经纬度的关系,确定杨属物种数量与经纬度的关系。

3 结果分析

3.1 杨属物种组成及空间分布特征

3.1.1 物种空间分布特征

据统计,杨属在全球有 100 多种天然物种,除了 1—2 种外大多数分布在温带,且主要集中在北半球南部

http://www.ecologica.cn

地区[25,41-42]。通常杨属物种的分布范围在 20—71°N 和 60—150°E 之间[25,28-29]。

该属物种广泛分布于中国大陆的大部分省区,尤其在北方地区物种丰富度更高。在中国的地理分布范围在 23.7°—51.7°N、74.8°—133.8°E 之间。最集中的区域在 35°—45°N、75°—130°E 之间(图 1)。

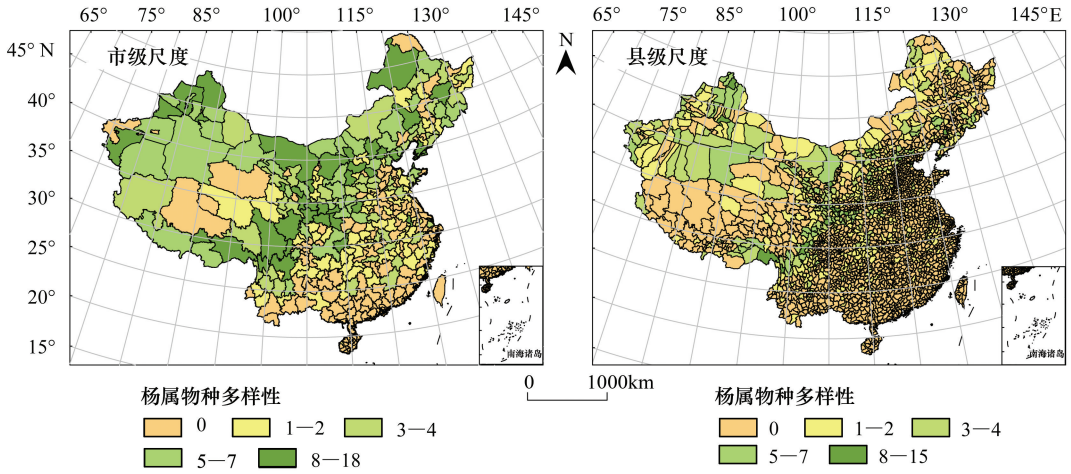

图 1　杨属物种多样性在中国市级和县级尺度的空间分布

Fig.1　Spatial distribution of genus *Populus* species diversity at the scale of city and county in China

其中,从行政区域来看,物种数量超过 20 种的地区主要集中于内蒙古、四川和甘肃,分布数量分别为 29、24 和 21 种。这 3 个地区的物种总数达 48 种,占全国所有物种数量的 55%。再次河北、陕西新疆均为 20 种,其次为沿着从东北—西南方向线这一带的地区,包括黑龙江、辽宁、北京、河北、山西、陕西、云南直到西藏地区,其分布数量在 10—20 种之间。物种分布较稀少的地区主要位于中国东南各省,如广西、广东、福建和海南等地,并且物种数量均少于 10 种。

统计表明杨属物种遍及中国大陆 30 个省级、200 个市级和 1694 个县级区域。其中 4 种分布区超过 100 个县;25 种分布区在 10—100 个县之间;59 种物种分布区不到 10 个县,其中 27 个物种只分布于一个县内(图略)。这表明杨属物种中 50%以上的物种分布范围较小,在中国杨属种内分布可能呈离散型。

杨属物种在市、县级行政尺度上多样性分布主要表现如下:(1)物种分布最多的地方在新疆的甘孜地区,总数为 18 种;(2)物种分布呈带状,在东西方向分布范围较南北方向宽;(3)不同行政尺度上物种丰富度均表现出由东北-西南方向的分界线,在该分界线的西北侧物种较丰富,在东南一侧物种较稀少;(4)从局地分布格局来看,如西藏地区,全部集中于西藏东南部与横断山脉交界处,并非均匀分布于西藏各市级地区。这表明杨属物种多样性在局地尺度上呈现聚集型分布(图 1)。这可能与喜马拉雅抬升,青藏高原呈西高东低的地貌有关。一方面,海拔梯度可能通过温度、湿度和太阳辐射等环境因子影响物种多样性分布规律,另一方面特殊的地形地貌可能对物种扩散具有一定隔离作用。

从图 1 可以看出,杨属物种主要集中分布在从西南到东北方向的几个植被区域,特别是横断山脉的南段、秦岭的中心地带、内蒙古与大兴安岭的中部;覆盖了中国西南-东北方向的主要区县,其中从腾冲县开始,途径德钦县、察隅县、康定县、舟曲县、宝鸡县、太白县、交口县、蔚县、通辽市、哈尔滨市直至黑河市一带,杨属物种占全国杨属物种总数的 50%以上。

3.1.2　物种分组分布特征

根据生物系统发生学理论与传统的形态学理论,国际上比较一致的结论将杨属划分为 5 组[28,41-42]。按照物种从低级到高级的进化历史,分为白杨组(Sect. *Populus*),大叶杨组(Sect. *Leucoides*),青杨组(Sect. *Tacamalhaca*),黑杨组(Sect. *Tacamahaca*),胡杨组(Sect. *Turanga*)。已有研究发现上述 5 组物种在中国均有分布。如图 2 所示,白杨组物种分布最广,青杨组次之,大叶杨组集中分布于中国西南地区,黑杨组主要分布于北方地区,胡杨组集中分布于西北地区,尤其集中于新疆。

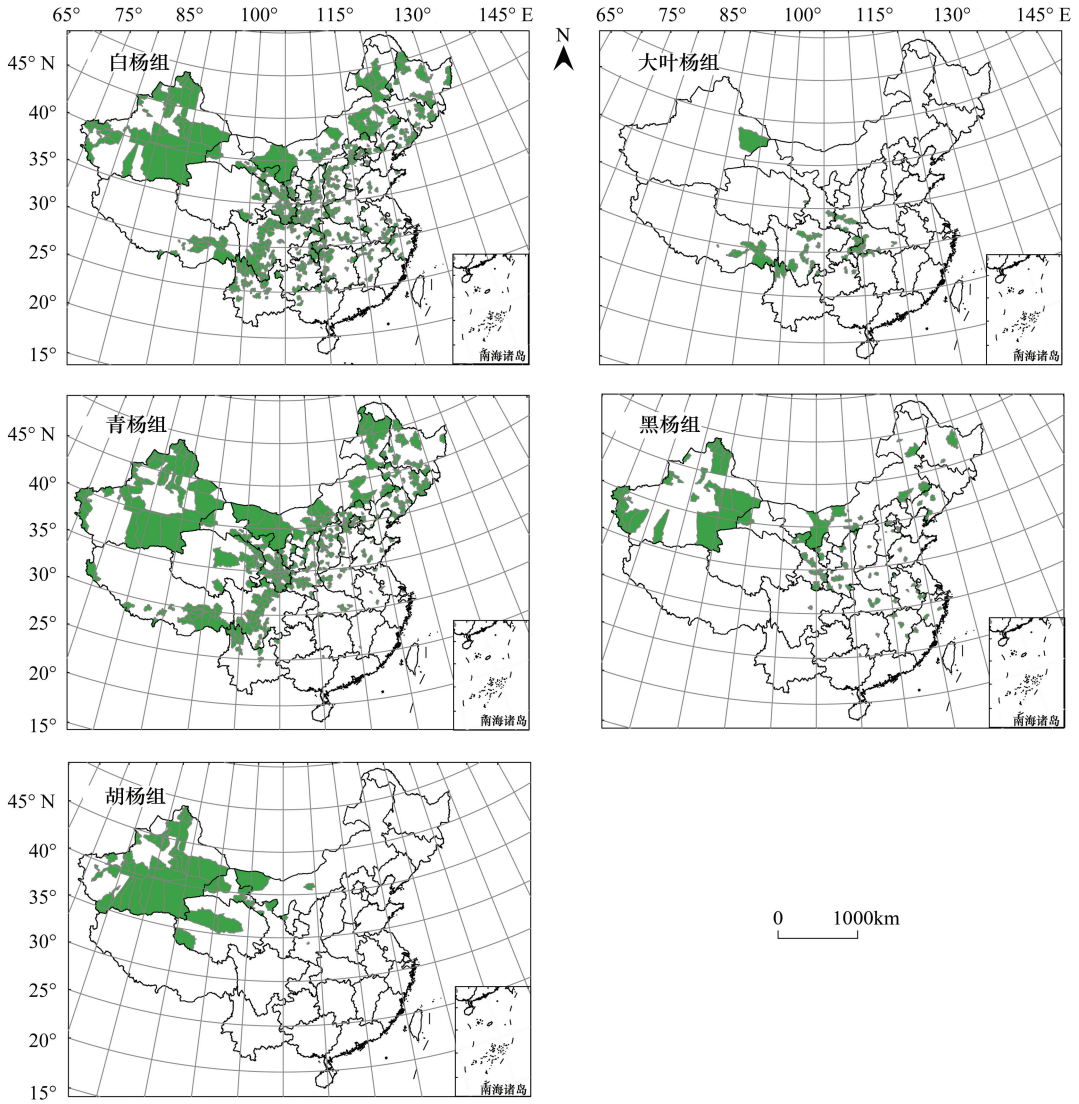

图 2 杨属物种在中国的分组空间分布

Fig.2 Spatial distribution of different sections of genus *Populus* in China

3.1.3 山杨、小叶杨、响叶杨和青杨在中国的空间分布范围及特征

由于不同物种有着不同的生态和地理特征,因此不同物种表现出特有的分布格局。研究发现山杨、小叶杨、响叶杨和青杨 4 种分布区共达 450 个县。其中山杨(*Populus davidiana* Dode.)分布区范围最广,分布于 252 个县;其次分别为小叶杨(*Populus simonii* Carr.),响叶杨(*Populus adenopoda* Maxim.),和青杨(*Populus cathayana* Rehd.),分别分布于 189、136、113 个县。

图 3 为山杨、小叶杨、响叶杨、青杨在中国区域的空间分布格局。从图中可以清楚地看出,山杨与小叶杨的分布均呈现出从东北-西南的方向性,但山杨分布范围比小叶杨更广。响叶杨主要集中分布于中国的东南地区,以重庆市为中心向周围辐射分布。青杨集中分布于中国的中部地区,并且上述 4 种物种较杨属的其他物种分布更为集中,呈现出分布中心区。

3.2 杨属物种多样性与经、纬度的关系

图 4 可以清楚表明,随着经纬度的增加,杨属物种数量先减少后增加。在纬度方向上物种丰富度最高的区间在 30°—40°N,经度方向上在 110°—120°E,物种数量分别为 63 种和 48 种。同时,研究发现在 30°—40°N 和 110°—120°E 的重叠区域内,杨属物种数量为 40 种,超过了 30°—40°N 纬度带或 110°—120°E 经度带上的

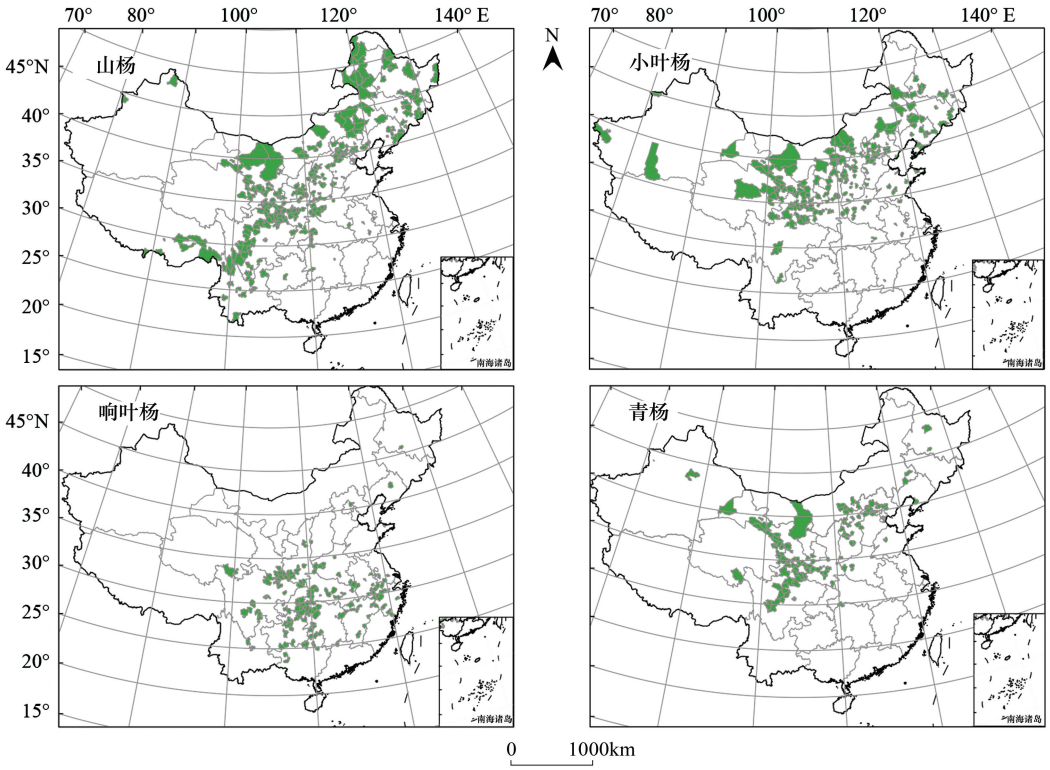

图 3　杨属中分布范围较广的 4 种物种在中国的空间分布

Fig.3　Spatial distribution of four primary species of *Populus* in China

物种数量的一半,在该区域范围内,经纬度非重叠区的面积要远远大于重叠区面积,但是物种数量却远远小于重叠区数量。这意味着杨属物种多样空间分布格局随经纬度的共同影响而变化。

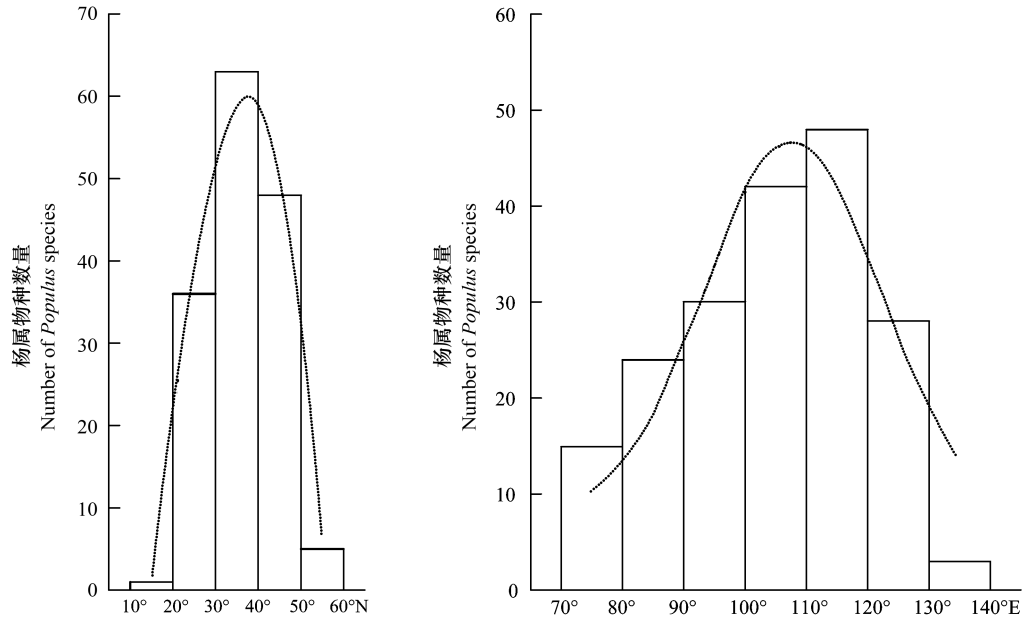

图 4　杨属物种数量与经、纬度的关系

Fig.4　The relationship between *Populus* species richness pattern and latitude and longitude respectively

如图 1 所示,杨属物种多样性在中国区域有一条明显的界线,即东北-西南沿线,在该界线上方即西北方,

物种分布数量较丰富,统计发现,物种数量占全国物种数的50%以上;在该界线下方即东南方向,物种丰富分布相对稀少。统计结果如图5所示,位于西北和东南两侧距离黑腾线5°带内杨属物种丰富度最高,物种数量达71种,从黑腾线分别向西北和东南方向物种数量逐渐减少。在黑腾线的东南一侧,杨属物种数量极其稀少,正对应广东和海南一带杨属物种的分布情况;在黑腾线西北一侧,物种丰富度并非连续减少,而是中间有先增加后减少的波动,波动的一带正好对应青藏高原一带。

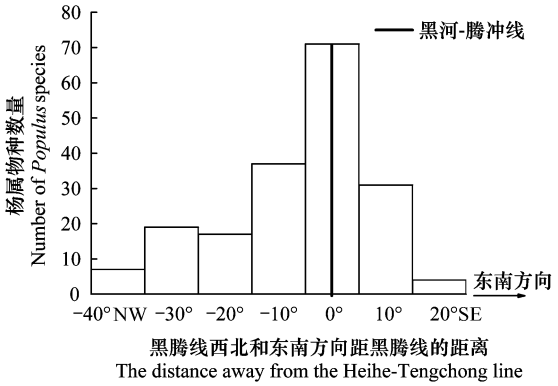

图5 杨属物种数量与距黑河-腾冲线距离的关系

Fig.5 The relationship between *Populus* species richness pattern and the distance awsy from the Heihe-Tengchong Line

通过对黑腾线两侧杨属物种丰富度与距黑腾线的距离进行线性回归,结果如表2所示,发现杨属物种丰富度 S 与距黑腾线距离 Z 呈负相关,回归系数为-0.675,回归模型通过95% 的显著性检验。表明在黑腾线东南一侧,随着与黑腾线的距离越远,杨属物种多样性呈下降趋势。通过黑河-腾冲线与经纬度的关系(2.2(1)),可以推断经纬度共同作用对杨属物种多样性分布格局影响的贡献率为45.6%。杨属物种多样性分布格局与经纬度的关系如图1所示,可见在黑河-腾冲沿线,杨属物种丰富度从东北向西南方向逐渐增加。

表2 距黑腾线距离(Z)与物种丰富度(S)的线性相关系数及其解释力

Table 2 Correlation between the distance away from the Hei-Teng line and species richness of Genus *Populus* and its test

模型 Model	系数 Coefficient (R)	显著性水平 Significance (P)	解释力 Explanatory power (R^2)
自变量 Variables	-0.675[a]	0.0000	0.456

a. 显著性水平 $a=0.05$, $P<0.05$ 表示通过95%的置信区间; b. 自变量为 Z,表示西北和东南两侧距黑腾线的距离;因变量为 S,表示杨属物种多样性

本文利用采集于1905—2008年的杨属物种标本信息,对杨属物种组成和地理分布格局进行了系统研究。结果表明,中国杨属物种在中国的地理分布范围为23.7°—51.7°N、74.8°—133.8°E区域内。物种丰富度最高的地方集中于内蒙古、四川和甘肃。但从市级尺度上看,新疆的甘孜藏族自治州物种数量最多有18种,从县级尺度上看,乌鲁木齐市辖区杨属物种最多有15种,其次为北京,有12种。白杨组和青杨组在中国分布范围最广,其中山杨、小叶杨、响叶杨和青杨是分布范围最广的前四个物种。

杨属在中国区域的物种多样性格局呈明显的纬向性,从北向南呈减少趋势;东西方向上物种丰富度高于南北方向;在纬度方向上物种多样性最丰富的地区位于30°—40°N,在经度方向上物种最丰富地区位于110°—120°E;杨属物种多样性分布格局与经纬度表现为明显的线性关系,经纬度共同解释了杨属物种多样性分布格局的45.6%。

杨属物种多样性在中国的分布中心位于东北到西南方向的黑河-腾冲线两侧,形状呈东北-西南方向狭长带状,分布有70多种杨属物种。在分布中心区域内,杨属物种多样性从东北向西南递增。

生物多样性的大尺度格局研究主要涉及以下4个方面的问题:(1)物种丰富度在纬度梯度上的规律;(2)物种、l能量关系;(3)局地与区域丰富度之间的关系;(4)物种丰富度上的分类差异[10]。物种多样性分布格局与地理位置、生境、复杂的地形以及多样的气候和土壤类型有着密切的关系,这些因子可能独立或者共同地影响物种多样性的分布格局。

关于纬度梯度对物种丰富度的影响,前人研究表明热带乔木多样性较高,在一定的面积或区域内,从高纬度地区到低纬度地区物种丰富度逐渐增加[43-44],虽然这种普遍性具有不确定性,增加趋势具有细微差别[9]。显然,本研究结果显示中国杨属物种的多样性分布中心在亚热带和温带,说明杨属沿纬度和经度梯度物种多

样性并非单调递增或递减,而是存在一个最适的区间,该区间内物种多样性最高;从而推断某一类群的物种多样性分布与植物界普遍性的大尺度格局分布规律有一定差异,这种差异可能是由物种本身的生物学特性或环境选择导致的物种起源或迁移有关。

物种多样性分布格局可能受很多因子影响,如能量、地形、生物多样性历史特征以及人类活动等[45-46],未来的研究将进一步探讨其他因子对该类群物种多样性分布格局的影响。

参考文献(References):

[1] Gentry A H. Tropical forest biodiversity: distributional patterns and their conservational significance. Oikos, 1992, 63(1): 19-28.

[2] Miller R I. Mapping the diversity of nature. Dordrecht: Springer, 1994: 8-15.

[3] Tittensor D P, Mora C, Jetz W, Lotze H K, Ricard D, Vanden Berghe E, Worm B. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. Nature, 2010, 466(7310): 1098-1101.

[4] Kivlin S N, Hawkes C V, Treseder K K. Global diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(11): 2294-2303.

[5] 王志恒. 中国木本植物物种多样性的地理格局、影响因子及尺度效应[D]. 北京: 北京大学, 2011: 186-188.

[6] Groombridge B. Global biodiversity: status of the earth's living resources. Dordrecht: Springer, 1992.

[7] Gaston K J. Biodiversity——latitudinal gradients. Progress in Physical Geography, 1996, 20(4): 466-476.

[8] Westgate M J, Barton P S, Lane P W, Lindenmayer D B. Global meta-analysis reveals low consistency of biodiversity congruence relationships. Nature Communication, 2014, 5: 3899.

[9] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. Nature, 2000, 405(6783): 220-227.

[10] 徐晓婷. 全球栎属的多样性格局及其对气候变化的响应[D]. 北京: 北京大学, 2013: 24-38.

[11] 应俊生. 中国种子植物物种多样性及其分布格局. 生物多样性, 2001, 9(4): 393-398.

[12] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局及其气候解释. 生物多样性, 2008, 16(5): 470-476.

[13] 杨洁. 青藏高原东缘亚高寒草甸处于演替阶段的物种多样性模式、物种多度和空间分布[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 30-35.

[14] 刘哲, 李奇, 陈懂懂, 翟文婷, 赵亮, 徐世晓, 赵新全. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响. 生物多样性, 2015, 23(4): 451-462.

[15] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1142-1154.

[16] 卢训令, 胡楠, 丁圣彦, 范玉龙, 廖秉华, 翟元杰, 柳静. 伏牛山自然保护区物种多样性分布格局. 生态学报, 2010, 30(21): 5790-5798.

[17] Hamilton A J. Species diversity or biodiversity? Journal of Environmental Management, 2005, 75(1): 89-92.

[18] Maclaurin J, Sterelny K. What is biodiversity? Chicago: University of Chicago Press, 2008: 27-41.

[19] Swingland I R. Biodiversity, definition of//Levin S A, ed. Encyclopedia of biodiversity. Amsterdam: Academic Press, 2001: 377-391.

[20] Dale M R T. Spatial pattern analysis in plant ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 1-12.

[21] 李智琦, 欧阳志云, 曾慧卿. 基于物种的大尺度生物多样性热点研究方法. 生态学报, 2010, 30(6): 1586-1593.

[22] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002: 289-294.

[23] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, 1(1): 20-22.

[24] Meikle R D. Willows and poplars of Great Britain and Ireland. London: Botanical Society of Britain & Ireland, 1984: 98-105.

[25] 丁托娅. 世界杨柳科植物的起源、分化和地理分布. 云南植物研究, 1995, 17(3): 277-290.

[26] Stettler R F, Bradshaw H D, Heilman Jr P E, Hinckley T M. Biology of populus and its implications for management and conservation. Ottawa: NRC Research Press, 1996: 213-230.

[27] FAO. Poplars and other fast-growing trees——renewable resources for future green economies——synthesis of country progress reports activities related to poplar and willow cultivation and utilization 2012 through 2016//25th Session and 48th Executive Committee Meeting of the International Poplar Commission. Berlin, Germany: FAO, 2016: 74-77.

[28] 王战, 方振富. 杨柳科//中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2004: 2-81.

[29] 董世林, 王战. 中国杨树地理分布规律的研究. 生态学杂志, 1988, 7(6): 12-18.

[30] Fang J Y, Wang Z H, Tang Z Y. Atlas of woody plants in China: distribution and climate. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 48-63.

[31] 郑万均. 中国树木志(第二卷). 北京: 中国林业出版社, 1985: 1954-2108.

[32] 马毓泉, 富象乾, 陈山. 内蒙古植物志(第八卷). 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1985: 160-177.

http://www.ecologica.cn

[33] 杨昌友. 新疆植物志(第一卷). 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993: 122-158.
[34] 廉永善, 孙坤, 安黎哲, 陈学林,马瑞君. 甘肃植物志第(二卷). 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2005: 38-71.
[35] 孙岱阳. 内蒙杨属二新种和六新变种. 南京林业大学学报, 1986, 10(4): 109-117.
[36] 梁书宾, 李兴文. 山东杨属一新种. 植物研究, 1986, 6(2): 135-137.
[37] 赵能. 杨属大叶杨组新植物. 四川林业科技, 1991, 12(3): 1-3.
[38] 冯自诚, 郭建林. 杨属植物一新种. 西北植物学报, 1990, 10(2): 132-134.
[39] 胡焕庸. 论中国人口之分布: 人口地理文集. 上海: 华东师范大学出版社, 1983.
[40] 王铮, 张丕远, 刘啸雷, 刘燕华. 中国生态环境过渡的一个重要地带. 生态学报, 1995, 15(3): 319-326.
[41] 于兆英, 张明理, 徐炳声, 桑涛. 杨属的分支分析. 植物研究, 1990, 10(1): 69-76.
[42] Taylor G. Populus: arabidopsis for forestry. Do we need a model tree? Annals of Botany, 2002, 90(6): 681-689.
[43] Rosenzweig M L. Species diversity gradients: we know more and less than we thought. Journal of Mammalogy, 1992, 73(4): 715-730.
[44] Brown J H, Lomolino M V. Biogeography. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 1998.
[45] Wiens J J, Donoghue M J. Historical biogeography, ecology and species richness. Trends in Ecology & Evolution, 2004, 19(12): 639-644.
[46] Wiens J J, Ackerly D D, Allen A P, Anacker B L, Buckley L B, Cornell H V, Damschen E I, Davies T J, Grytnes J A, Harrison S P, Hawkins B A, Holt R D, McCain C M, Stephens P R. Niche conservatism as an emerging principle in ecology and conservation biology. Ecology Letters, 2010, 13(10): 1310-1324.

http://www.ecologica.cn