西北植物学报,2016,36(3):0606－0617
Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.

文章编号:1000-4025(2016)03-0606-12 **doi**:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.03.0606

中国亚麻酸资源植物分布格局及其与气候和地理因子的关系

肖佳伟,孙　林,陈功锡*,张梦华

(吉首大学 植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室,湖南吉首 416000)

摘　要:据资料统计,中国种子植物中具有开发利用价值的亚麻酸资源植物共计116科、446属、816种。该研究以大尺度的植物物种分布信息为基础,通过对中国亚麻酸资源植物及其地理、环境、气候等因子的统计分析,探讨中国亚麻酸资源植物的分布格局及其影响因子。结果表明:(1)唇形科、大戟科、豆科、蔷薇科、十字花科、葫芦科等类群中亚麻酸资源植物较为丰富且分布较广,是中国最重要的亚麻酸资源植物类群。(2)西南地区亚麻酸资源植物丰富度最高,并以此为中心向四周降低。(3)亚麻酸资源植物丰富度随着海拔的升高先增加后降低,在900 m左右最丰富。(4)气候因子对亚麻酸资源植物分布影响较大,其中相对湿度、年平均温度、年降雨量是导致中国亚麻酸资源植物分布格局的主要原因,且与亚麻酸资源植物丰富度成正相关关系,而纬度、年辐射量、平均海拔等因子成负相关关系;地形因子是一个独立因子。(5)聚类分析结果将中国亚麻酸资源植物分布地划分为十类地区,一定程度上揭示了亚麻酸植物在中国的分布特点。

关键词:亚麻酸资源植物;分布格局;聚类分析

中图分类号:Q948.5　　**文献标志码**:A

Distribution Patterns of Linolenic Acid Plants in China and Its Relationship with Climate and Geographical Factors

XIAO Jiawei, SUN Lin, CHEN Gongxi*, ZHANG Menghua

(Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Utilization, Jishou University, Jishou, Hu'nan 416000, China)

Abstract: There were about 816 species linolenic acid plant resources which belong to 446 genera and 116 families in China, and their oil and linolenic acid contents of seeds were higher than 10%. In this paper, distribution patterns of linolenic acid plant resources in China and its relationship with climatic and geographical factors were investigated based on flora listsin largescale, coupled with principal component analysis. The results show that: 1) Labiatae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Rosaceae, Brassicaceae and Cucurbitaceae families have abundant linolenic acid plant resource species. 2) The region species richness of linolenic acid resource plants showed trend of descend around a center (the Southwestern China). 3) The altitude species richness showed unimodal pattern that increased first and then decreased with the increase of altitude, with the maximum value appeared at the height of about 900 m. 4) The climate factors significantly affected the distribution of linolenic acid plant resources. The relative humidity, annual average temperature and annual precipitation, were positively associated with species richness. In addition, there were negative correlations between species richness and Latitude, annual radiation quantity, mean altitude. 5) China was divided into 10 distribution areas of linolenic acid resource plants by cluster analysis. Above results partly revealed the dis-

收稿日期:2015-12-31;**修改稿收到日期**:2016-03-09

基金项目:湖南省高校产业化培育项目(10CY010);科技部国家科技基础性专项重点项目(2008FY110400-1-9)

作者简介:肖佳伟(1992－),男,在读硕士研究生,主要从事植物资源与植物生态学研究。

*通信作者:陈功锡,教授,主要从事植物分类学、植物区系学及植物生态学的教学与科研工作。E-mail:chengongxi2011@163.com

tribution characteristics of linolenic acid resource plants in China.
Key words: linolenic acid resource plants; distribution patterns; cluster analysis

植物的分布与自然环境条件密切相关，地球表面不同环境因子导致了地表植物和植被分布的多样性；同时，植物的形成发展一定程度上又作用于环境要素，促使环境条件呈现各种复杂和多样的变化。近半世纪以来，国内外学者[1-7]从物种多样性、植物区系成分、植被等多个角度对中国植物分布的多样性进行了比较广泛和深入阐述，为植物多样性格局形成与演化研究提供了基础和理论依据，但这些研究大多以定性为主，总体上和量化分析还有待进一步深入拓展。目前，国内有关植物多样性格局的研究在小尺度地域范围内已经开展了大量工作[8-13]，大尺度的全国性研究也越来越受重视[14-17]。但迄今为止，大尺度全国范围内特定资源植物分布的研究依然少见，尤其是对亚麻酸资源植物分布研究至今仍未见报道。

亚麻酸是对人体具有重要功能的高度不饱和酸，分为全顺式 9、12、15 十八碳三烯酸和全顺式 6、9、12 十八碳三烯酸，是构成人体组织细胞的主要成分，且必须从体外摄取[18]。近 20 年来人们对亚麻酸有了比较深刻的认识，发现其对人体多种疾病尤其是对调节血脂[19-21]、降低血压、抗肿瘤[22]、预防心脑血管疾病[23]等有着特殊的疗效。由于亚麻酸多存在于特定的植物和水生生物中，日常饮食中并不丰富，人们对其的市场需求越来越大，使亚麻酸的开发成为当今健康产品领域的热点，有力地推动了亚麻酸产业的形成与发展。植物是自然界亚麻酸主要来源，1 500～2 000 种种子植物含有亚麻酸成分。进一步认识和研究亚麻酸植物资源及其在植物界分布的规律，探索亚麻酸与植物系统演化以及自然环境条件之间的相互关系，对于深入调查寻找资源，促进亚麻酸植物科学研究和产业发展，无疑具有重要的理论与实践意义。本研究拟通过对亚麻酸资源植物统计和分析，弄清中国亚麻酸资源植物的分布格局以及影响因子，同时为探寻资源及产业化开发提供理论依据。

1　数据来源及方法

1.1　自然环境概况

中国位于亚洲大陆东部，太平洋西岸，陆地面积约 960 万 km^2，受不同地理位置、地貌、气候的影响，可以分为东部季风湿润区、西北干旱区、青藏高寒区三大自然地理区[24]。地势从西向东降低，从素称“世界屋脊”的青藏高原逐级而下达到东部滨海平原。地貌类型多样，主要有平原、丘陵、盆地、高原、山地[25]；中国地跨赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带和寒温带，主要是大陆季风气候特征，冬冷夏热，冬干夏雨；从东到西，降水呈递减趋势，年平均降水量从东部地区的 1 500～2 000 mm，递减到西部地区的 50 mm 以下。从北到南，依次分布着寒温带针叶林带、温带针阔叶混交林带、暖温带落叶常绿阔叶混交林带、亚热带常绿阔叶林带和热带雨林季雨林带[26]。从东到西（以 42°N 为例）大致依次分布着针叶落叶阔叶林带、森林草原植被带、草原植被带和荒漠-半荒漠植被带，这与研究区域内的水分条件的空间分格局是比较一致的[27]。

1.2　资料获取

从《中国植物志》[28]《*Flora of China*》[29]中国数字植物标本馆标本记录[30]及《中国油脂植物》[31]《中国资源植物》[32]和有关亚麻酸资源植物研究的期刊论文、学术专著以及中国科学院华南植物园非粮柴油能源植物及相关微生物专题网站数据库[33]等获取原始数据，整理、统计得出中国植物种子中含油量较高（≥10%）以及亚麻酸含量较高（油中亚麻酸含量≥10%）的亚麻酸资源植物共计 116 科、446 属、816 种，并就 816 种亚麻酸资源植物在各省的分布、海拔上下限等进行统计，并建立数据库。

为了分析中国亚麻酸资源植物的多样性分布格局成因，本研究引用了中国科学院植物研究所黄继红博士收集整理的数据。包括年均温、1 月均温、年降雨量、年辐射量、相对湿度、表面积与投影面积比值等气候和地理因子（表 1）[34]。

1.3　数据处理

首先通过对中国各省区亚麻酸资源植物的物种数量分布情况与经纬度的关系构建回归线方程，经纬度取值参照严岳鸿等[34]的方法，取其各省区所在经纬度范围的平均值，通过回归线方程的斜率正负来判断其是正相关还是负相关以及 R^2 判定系数、sig(F)统计显著性水平来判断其关系的显著性。再次，对其丰富度和各省区的地理、环境和气候因子进行主成分分析，通过相关系数分析得到各个因子之间的关系、各个因子之间的联系以及通过特征值的提取来判断哪些因子对亚麻酸资源植物分布影响较

表 1 气候和地理因子

Table 1 Climate and geographical factors

地区 Region	年均温 Annual temperature /℃	1月均 Jan. average temperature /℃	7月均温 Jul. average temperature /℃	年降雨量 Annual rainfall /mm	年辐射量 Annual radiation quantity /(MJ/m²)	相对湿度 Relative humidity /%	平均海拔 Mean altitude /m	海拔标准差 Standard deviation /m	表面积与投影面积之比 Ratio of surface area to projected area
黑龙江 Heilongjiang	1.28	−21.21	20.54	543.09	4 663.63	67.93	309.98	210.21	3 478.49
吉林 Jilin	4.34	−16.39	21.84	641.48	4 938.95	65.84	403.35	289.54	4 307.09
辽宁 Liaoning	7.67	−10.94	23.47	708.43	5 200.89	62.53	231.28	205.97	4 566.76
内蒙古 Inner Mongolia	3.47	−16.46	21.09	320.92	5 200.89	62.53	231.28	205.97	4 566.76
新疆 Xinjiang	4.92	−12.32	19.53	120.28	5 831.65	48.19	1 933.67	1 459.95	8 286.67
宁夏 Ningxia	7.65	−7.90	21.16	298.49	5 759.60	54.91	1 565.66	343.08	6 102.06
青海 Qinghai	−2.13	−14.93	9.35	330.00	6 126.72	49.62	4 035.41	802.56	9 913.24
甘肃 Gansu	5.17	−9.39	18.06	323.88	5 760.39	53.15	2 088.28	862.13	9 504.61
陕西 Shaanxi	10.10	−3.50	22.39	693.61	4 960.22	64.60	1 126.94	408.53	11 030.73
西藏 Xizang	−0.80	−11.96	9.62	410.91	6 292.80	48.58	4 726.48	847.00	14 392.43
四川 Sichuan	8.97	−1.00	17.95	1 015.56	4 562.11	69.81	2 317.85	1 628.12	18 695.54
贵州 Guizhou	14.81	4.70	23.48	1 228.00	3 902.51	79.89	1 106.61	425.96	9 687.90
云南 Yunnan	14.81	7.85	20.20	1 178.91	5 312.52	73.63	1 879.56	738.12	18 171.32
山西 Shanxi	7.47	−7.78	21.34	520.34	5 426.14	58.88	1 156.71	374.56	8 332.62
河北 Hebei	9.27	−7.54	23.81	542.86	5 494.67	59.32	499.36	543.63	5 417.96
山东 Shandong	12.37	−2.04	25.80	706.44	5 400.71	66.84	93.60	112.17	1 995.70
河南 He'nan	14.00	0.40	26.32	817.66	5 002.07	70.14	243.17	308.56	3 657.85
安徽 Anhui	15.17	2.14	27.28	1 269.30	4 867.00	75.70	117.63	191.55	3 844.04
江苏 Jiangsu	14.84	1.79	27.23	1 047.26	5 013.60	75.95	14.79	21.12	553.23
湖北 Hubei	14.77	2.56	26.11	1 275.50	4 500.04	76.52	428.17	485.64	7 776.28
湖南 Hu'nan	16.17	4.60	26.92	1 487.31	4 169.01	80.28	357.36	296.60	7 566.89
江西 Jiangxi	17.24	5.73	27.85	1 693.36	4 563.23	79.39	243.18	228.15	6 890.60
浙江 Zhejiang	15.76	4.60	26.57	1 602.91	4 663.66	79.31	307.50	298.15	10 860.82
福建 Fujian	17.51	8.36	25.88	1 626.11	4 728.92	81.75	485.20	296.65	12 475.91
台湾 Taiwan	14.03	12.27	16.15	1 496.78	5 520.18	84.64	797.59	833.99	17 037.20
广东 Guangdong	20.80	12.20	27.57	1 787.30	4 898.02	79.51	219.95	229.29	7 654.10
海南 Hainan	23.74	18.13	27.62	1 793.29	5 721.55	82.54	196.09	226.88	5 908.45
广西 Guangxi	19.84	10.55	26.93	1 630.25	4 476.17	78.93	395.32	318.64	8 183.33

大等。最后，将各省区中的种以 0、1 数据作为观测值。有变量中的种输入 1，无变量中的种输入 0，这样形成一个 0、1 的矩阵，从而得出各省区之间亲缘关系树形图，进行聚类分析。

在聚类分析中，由于香港、澳门、北京、天津、上海和重庆各特区及直辖市的面积和数据因素，对其进行了相应的处理：香港、澳门并入广东，上海并入浙江，北京、天津并入河北，重庆并入四川。以上作图、分析均在 SPSS19 和 Excel2007 软件中运行。

2 结果与分析

2.1 亚麻酸资源植物的分布格局

2.1.1 水平分布格局 中国亚麻酸资源植物种类丰富，但地理分布不均匀，各省市、自治区情况分布情况见表 2。从中可以看出：在各省区分布数量存在较大差异，从最少 102 种（澳门）到最多 550 种（云南）不等，大多集中在 100 到 200 种之间，物种数量较多的 10 个省区（市）依次为：云南、广西、广东、四川、贵州、湖南、福建、江西、湖北、浙江。云南是中国含亚麻酸资源植物丰富的地区，达到 550 种，占总数的 67.4%，并且还有部分为云南特有。西南地区亚麻酸资源植物丰富，在前十的省区中占有 3 个，即云南（550 种），四川（462 种），贵州（453 种）。

通过对中国各省区经纬度的与物种丰富度的线性回归分析，结果表明，各省区亚麻酸植物物种丰富度与纬度变化具有高度的线性负相关，即随着纬度

的增加亚麻酸资源植物逐渐减少。其中 $K=-9.38$，$R^2=0.256$，sig(F)=0.002，[K 为斜率，R^2 为判定系数，sig(F)为统计显著性水平]。中国各省亚麻酸植物物种密度与纬度变化呈线性负相关，其中 $K=-0.322$，$R^2=0.069$，sig(F)=0.072。中国各省区亚麻酸资源植物丰富度和物种密度与经度变化线性相关不显著，其中植物资源丰富度与经度变化，$K=-1.029$，$R^2=0.05$，sig(F)=0.683，物种密度与经度变化，$K=0.044$，$R^2=0.003$，sig(F)=0.753。新疆、西藏等经度低的地区亚麻酸资源植物有百余种，然而在黑龙江等经度较高省区物种数也有百余种。具体变化如图 1 所示。亚麻酸资源植物在纬度上呈现出随着纬度的上升物种数量降低，而在经度上呈现出单峰形式，峰值出现在 100°E 左右，这样亚麻酸植物丰富度最高的经纬度的交汇区域就是中国西南横断山脉地区。可见中国西南地区为亚麻酸资源植物的分布中心，并呈现出向东、向西、向北和向南均减少分布格局。

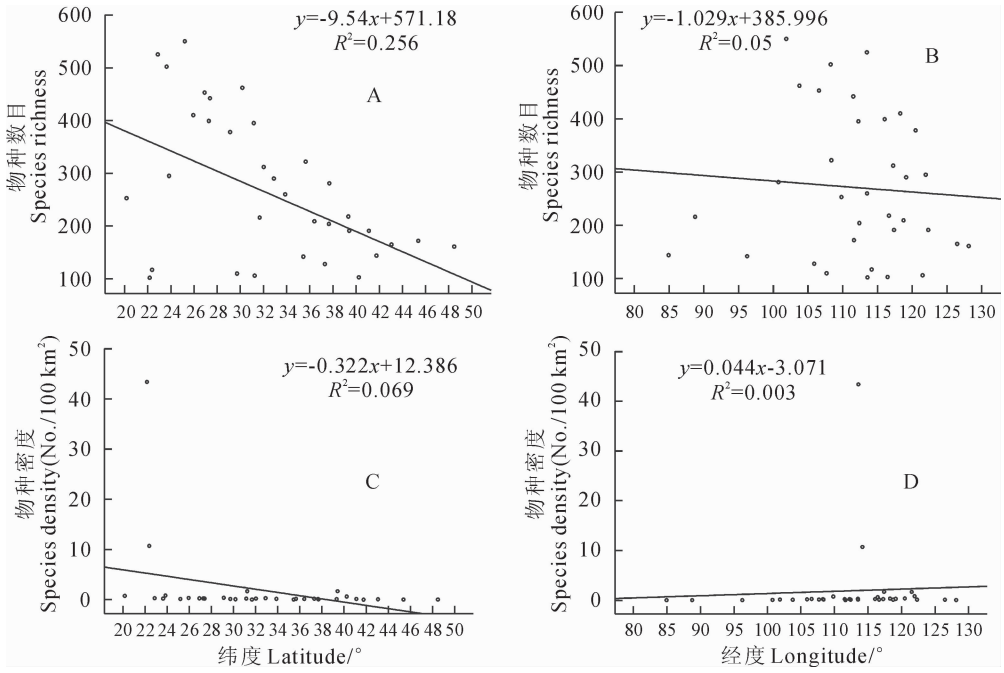
表 2　中国各省区(市)亚麻酸资源植物分布统计

Table 2　Distribution of Linolenic acid plant resources in China' provinces (cities)

地区 Region	纬度 Latitude	经度 Longitude	物种数 * Species richness	面积 Area/km²	密度 Species Density (No./100km²)
黑龙江 Heilongjiang	48.48	128.14	161	453 900	0.035
吉林 Jilin	43.06	126.47	165	187 400	0.088
辽宁 Liaoning	41.11	122.31	191	145 900	0.131
内蒙古 Inner Mongolia	45.37	111.62	172	1 183 000	0.015
新疆 Xinjiang	41.76	84.94	144	1 660 000	0.009
宁夏 Ningxia	37.31	105.9	128	66 400	0.193
青海 Qinghai	35.44	96.24	142	721 000	0.020
甘肃 Gansu	37.69	100.74	281	390 000	0.072
陕西 Shaanxi	35.65	108.37	322	205 600	0.157
西藏 Xizang	31.67	88.75	216	1 210 000	0.018
四川 Sichuan	30.18	103.77	462	490 000	0.094
贵州 Guizhou	26.92	106.59	453	176 000	0.257
云南 Yunnan	25.20	101.86	550	394 000	0.140
山西 Shanxi	37.66	112.39	204	156 200	0.131
河北 Hebei	39.33	116.65	218	187 700	0.116
山东 Shandong	36.40	118.75	209	156 700	0.133
河南 He'nan	33.88	113.50	260	167 000	0.156
安徽 Anhui	32.03	117.26	312	139 000	0.224
江苏 Jiangsu	32.90	119.13	290	102 600	0.283
湖北 Hubei	31.16	112.25	395	185 900	0.212
湖南 Hu'nan	27.38	111.52	442	211 800	0.209
江西 Jiangxi	27.28	116.03	399	166 900	0.239
浙江 Zhejiang	29.12	120.49	378	101 800	0.371
福建 Fujian	25.94	118.28	410	123 800	0.331
台湾 Taiwan	23.85	121.95	295	36 000	0.819
广东 Guangdong	22.87	113.48	525	178 000	0.295
海南 Hainan	20.18	109.82	253	33 900	0.746
广西 Guangxi	23.64	108.27	502	236 600	0.212
北京 Beijing	40.24	116.45	103	16 800	0.613
天津 Tianjin	39.41	117.39	191	11 300	1.690
上海 Shanghai	31.24	121.51	106	6 300	1.683
重庆 Chongqing	29.72	107.68	110	82 000	0.134
香港 Hong Kong	22.38	114.15	117	1 092	10.714
澳门 Macau	22.18	113.55	102	235	43.404

注：* 物种丰富度由物种数目体现[35]

Note: * Species richness is reflected by the number of species.



A. 中国亚麻酸植物物种丰富度与纬度的变化关系；B. 中国亚麻酸植物物种密度与纬度的变化关系；
C. 中国亚麻酸植物物种丰富度与经度的变化关系；D. 中国亚麻酸植物物种密度与纬度的变化关系

图 1 中国亚麻酸植物多样性与经度、纬度变化之间的关系

A. Relationship between species richness and latitude of Chinese Linolenic acid plant; B. Relationship between density and latitude of Chinese Linolenic acid plant species; C. Relationship between species richness and longitude of Chinese linolenic acid plant; D. Relationship between density and latitude of Chinese Linolenic acid plant species

Fig. 1 The relationship between the diversity and the changes of the longitude and latitude of the Linolenic acid plant in China

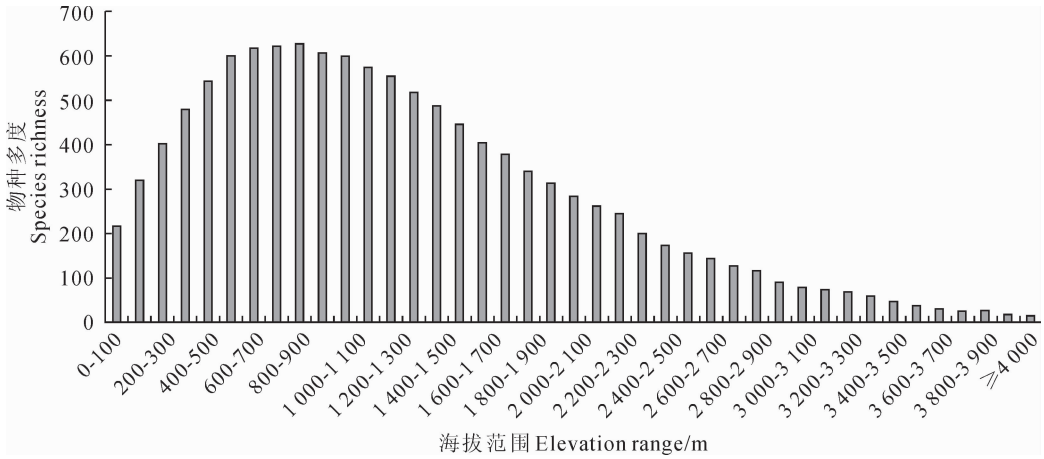


图 2 中国亚麻酸植物资源垂直分布图

Fig. 2 Vertical distribution of Linolenic acid plant resources in China

2.1.2 垂直分布格局 中国含亚麻酸植物资源海拔分布范围非常广(图 2)，从海平面到 4 000 m 范围内均有分布，且呈现出单峰形态。分布在海拔为 4 000 m以上范围内的亚麻酸资源植物很少，且以草本为主，如多花黄耆(*Astragalus floridus*)、贡山蓟(*Cirsium eriophoroides*)、西藏花旗杆(*Dontostemon tibeticus*)和黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)等。低海拔地区亚麻酸资源植物较少，只有 500 余种，约占全国总数的 65%，该区不仅有乔木，还有灌木、草本和藤本，如黑嘴蒲桃(*Syzygium bullockii*)、刺果藤(*Byttneria grandifolia*)、紫花含笑(*Michelia crassipes*)和抱茎独行菜(*Lepidium perfoliatum*)等。海拔为 500～1 500 m的中低山范围内，共有亚麻酸资源植物 752 种，达到总数的 92%，其中海拔为 800

表 3　相关系数矩阵

Table 3　Correlation matrix

相关系数 correlation coefficient	物种数 Species richness	物种密度 Species density	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均温 Annual temperature	1 月均温 Jan. average temperature	7 月均温 Jul. average temperature	年降雨量 Annual rainfall	年辐射量 Annual radiation quantity	相对湿度 Relative humidity	平均海拔 Mean altitude	海拔标准差 Standard deviation	表面积与投影面积之比 Ratio of surface area to projected area	省区(市)面积 Area
物种数 Species richness	1.00	0.26	−0.76	0.01	0.69	0.74	0.39	0.76	−0.63	0.60	−0.17	0.03	0.46	−0.33
物种密度 Species density	0.26	1.00	−0.68	0.33	0.68	0.77	0.31	0.70	−0.09	0.70	−0.37	−0.20	0.17	−0.53
纬度 Latitude	−0.76	−0.68	1.00	0.09	−0.79	−0.94	−0.28	−0.85	0.25	−0.69	0.05	0.01	−0.45	0.39
经度 Longitude	0.01	0.33	0.09	1.00	0.30	0.12	0.54	0.36	−0.47	0.55	−0.79	−0.68	−0.42	−0.69
年均温 Annual temperature	0.70	0.68	−0.79	0.30	1.00	0.94	0.79	0.89	−0.51	0.86	−0.62	−0.37	−0.01	−0.61
1 月均温 Jan. average temperature	0.74	0.77	−0.94	0.12	0.94	1.00	0.54	0.90	−0.36	0.82	−0.35	−0.16	0.26	−0.53
7 月均温 Jul. average temperature	0.39	0.31	−0.28	0.54	0.79	0.54	1.00	0.61	−0.63	0.67	−0.89	−0.63	−0.50	−0.57
年降雨量 Annual rainfall	0.76	0.70	−0.85	0.36	0.89	0.90	0.61	1.00	−0.57	0.93	−0.48	−0.31	0.17	−0.56
年辐射量 Annual radiation quantity	−0.63	−0.09	0.25	−0.47	−0.51	−0.36	−0.63	−0.57	1.00	−0.70	0.58	0.31	0.07	0.42
相对湿度 Relative humidity	0.60	0.70	−0.69	0.55	0.87	0.82	0.67	0.93	−0.70	1.00	−0.65	−0.41	0.06	−0.63
平均海拔 Mean altitude	−0.17	−0.37	0.05	−0.79	−0.62	−0.63	−0.89	−0.47	0.58	−0.65	1.00	0.67	0.56	0.57
海拔标准差 Standard deviation	0.03	−0.20	0.01	−0.68	−0.37	−0.16	−0.63	−0.31	0.31	−0.41	0.67	1.00	0.68	0.56
表面积与投影面积之比 Ratio of surface area to projected area	0.46	0.17	−0.45	−0.43	−0.01	0.26	−0.50	0.17	0.07	0.06	0.56	0.68	1.00	0.16
省(市)区面积 Area	−0.33	−0.53	0.39	−0.69	−0.61	−0.53	−0.57	−0.56	0.42	−0.63	0.57	0.56	0.16	1.00

～900 m的区间上亚麻酸资源植物最为丰富，达到628种，约占总数的77%。中低山范围内分布着紫楠（*Phoebe sheareri*）、白木乌桕（*Sapium japonicum*）、紫苏（*Perilla frutescens*）、山鸡椒（*Litsea cubeba*）、臭檀吴萸（*Evodia daniellii*）、金樱子（*Rosa laevigata*）等亚麻酸资源植物。豆科（Leguminosae）、大戟科（Euphorbiaceae）、蔷薇科（Rosaceae）、芸香科（Rutaceae）、唇形科（Labiatae）等是该区分布较多的科。

2.2 中国各省区亚麻酸植物物种丰富度与气候和地理因子之间的主成分分析

主成分分析得到各个因子之间的相关系数如表3所示。矩阵显示，中国各省区的亚麻酸资源植物丰富度和物种密度均与年均温、1月均温、年降雨量、纬度、相对湿度密切相关。与其他因子的相关系数均小于0.5。其中与物种丰富度关系最为密切的因子依次为年降雨量、纬度、1月均温、年均温和相对湿度。且纬度、年辐射量、平均海拔等因子与亚麻酸资源丰富度成负相关，与其余因子成正相关。

此外，该表的各个因子的相关系数还显示了除物种丰富度及物种密度之外的环境、地理、气候等因子之间存在的一些关联性。如年均温与1月均温的相关系数达到0.94，与相对湿度、降雨量、纬度、7月均温、平均海拔、年辐射量等因子有着密切的关联性。相对湿度与其它因子如经度、纬度、年均温、降雨量、1月均温、7月均温等因子有着密切的关联性，相关系数除省区面积和表面积与投影面积之比以外都达到0.5以上。然而地形因子，如表面积与投影面积之比和海拔标准差与其它地理、气候因子之间的关联性相对较低。例如，表面积与投影面积（区域的表面积与正投影面积之比，数值越大表示山地越多和越高）之比仅与平均海拔（0.56）和海拔标准差（0.68）联系密切，与其他气候、地理因子联系均不显著，相关系数均小于0.5，这表明地形因子特别是表面积与投影面积之比是一个较为独立的环境因子，且当其发生作用时不易受其他因子影响。

在主成分分析中，提取主成分个数的原则是主成分对应的特征值大于1的前n个主成分（特征值）在某种程度上可以被看成是表示主成分影响力度大小的指标，如果小于1，表明该主成分的解释力度还不如直接引入一个原变量的平均解释力度大，因此一般可用特征值大于1作为纳入标准。由表4可知，提取3个主成分。3次各主成分的特征向量值依次为7.531、3.355、1.193，且3个主成分依次解释了53.791%、23.963%、8.523%的物种分布变异，这3个主成分共解释86.278%的环境因子与亚麻酸植物资源的分布格局的变异。由表5可知，在第一主成分中有较高载荷的因子为相对湿度、年均温、年降雨量、1月均温、7月均温、物种数目、物种密度，说明在第一主成分基本反映了这些指标的信息；表面积与投影面积之比、海拔标准差及平均海拔在

表4 方差分解主成分提取分析表

Table 4 Principal component analysis of variance decomposition

主成分序号 Principal component number	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution rate /%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	7.531	53.791	53.791
2	3.355	23.963	77.754
3	1.193	8.523	86.278
4	0.790	5.641	91.918
5	0.469	3.350	95.268
6	0.318	2.269	97.537
7	0.162	1.154	98.691
8	0.092	0.656	99.347
9	0.050	0.359	99.706
10	0.022	0.154	99.860
11	0.010	0.073	99.933
12	0.007	0.047	99.980
13	0.002	0.012	99.993
14	0.001	0.007	100.000

表5 因子载荷矩阵

Table 5 Component matrix

初始因子 Initial factor	主成分 Principal component		
	1	2	3
物种数目 Species richness	0.679	0.515	−0.463
物种密度 Species density	0.689	0.231	0.608
纬度 Latitude	−0.709	−0.648	−0.146
经度 Longitude	0.549	−0.653	0.090
年均温 Annual temperature	0.944	0.146	0.042
1月均温 Jan. average temperature	0.863	0.436	0.159
7月均温 Jul. average temperature	0.797	−0.421	−0.177
年降雨量 Annual rainfall	0.928	0.272	−0.004
年辐射量 Annual radiation quantity	−0.657	0.151	0.663
相对湿度 Relative humidity	0.956	0.075	−0.056
平均海拔 Mean altitude	−0.713	0.614	0.057
海拔标准差 Standard deviation	−0.505	0.692	−0.146
表面积与投影面积之比 Ratio of surface area to projected area	−0.057	0.886	−0.071
省区（市）面积 Area	−0.739	0.239	−0.221

第二主成分上有较高的载荷，说明第二主成分基本反映了这 3 个指标的信息。在第三主成分中只有年辐射量载荷较高，说明在这个主成分中仅反映了年辐射量这个指标信息。

第一主成分主要包括的环境因子反映了中国各省区亚麻酸植物物种丰富度与相对湿度、年均温、年降雨量、1 月均温、7 月均温、经度等因子呈正相关，与纬度、年辐射量、平均海拔、海拔标准差等因子呈负相关。第二主成分主要包括的因子反映了中国各省区的亚麻酸植物物种丰富度与平均海拔、表面积与投影面积之比呈正相关，且与后者有着显著的正相关，特征值达到了 0.886，与经纬度、7 月均温呈负相关。第三主成分中中国各省区亚麻酸植物物种丰富度与年辐射量呈正相关。

2.3　中国各省区亚麻酸资源植物聚类分析

为探讨中国各省区亚麻酸资源植物之间的联系，对中国各省区的亚麻酸资源植物进行聚类分析，得出亲缘关系树形图（图 3），以 $Y=10.5$ 作为参考线可将中国各省区分为 10 类。

第一类：东北－华北－西北地区，包括 11 个省区。即黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山西、河北（含北京和天津）、山东、宁夏、青海、新疆和西藏。由于该区深居中国内陆导致植物生长环境较差，从而物种

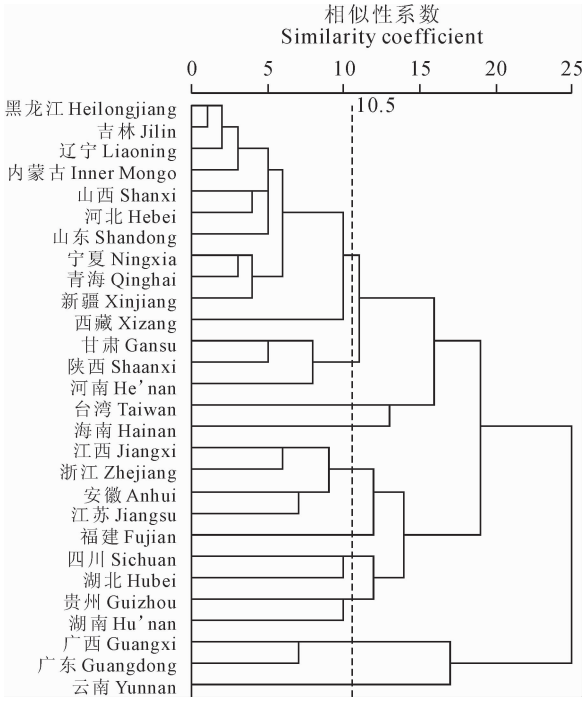


图 3　中国各省区亚麻酸资源植物物种多样性聚类分析图

Fig. 3　Cluster analysis of plant species diversity of Linolenic acid resources in China

相对贫乏，且各省区之间的物种相似性程度非常高，因此聚为一类。该区含亚麻酸物种数量都不足 300 种，但是芍药（*Paeonia lactiflora*）、风箱果（*Physocarpus amurensis*）、刺榛（*Corylus ferox*）、蓝萼香茶菜（*Rabdosia japonica*）等是在其他地区较少甚至没有分布且含亚麻酸资源较多的物种。豆科、蔷薇科、葫芦科（Cucurbitaceae）等是该地区分布较广的科，芸苔属（*Brassica*）、山茶属（*Camellia*）、鼠李属（*Rhamnus*）等是该地区主要的类群。

第二类：秦岭地区，即以秦岭山脉为中心的甘肃、陕西、河南 3 个省区。该区与其它地区的物种相似距离较远，但甘肃、陕西、河南这 3 个地区之间的物种相似程度很大，该区有 365 种亚麻酸资源植物，共有种达 302 种。以华山松（*Pinus armandi*）、峨眉蔷薇（*Rosa omeiensis*）、锐齿槲栎（*Quercus aliena* var. *acuteserrata*）等为重要亚麻酸资源植物。该地区以豆科、蔷薇科、唇形科为主，并以芸苔属、南蛇藤属（*Celastrus*）、鼠李属的种类最多。

第三类：只有 1 个地区，即台湾。北回归线通过该区，把台湾划为 2 个气候区，北部属亚热带季风气候，南部则为热带季风气候。该区虽然有着温暖湿润的气候，但是由于台湾位于环太平洋地震带和火山带上导致亚麻酸资源植物不是很丰富，种类不到 300 种。分布着台湾扁柏（*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*）、台湾十大功劳（*Mahonia japonica*）、阿里山十大功劳（*Mahonia oiwakensis*）、台湾林檎（*Malus doumeri*）、圆叶南蛇藤（*Celastrus kusanoi*）、椰子等亚麻酸资源植物，其中台湾扁柏和台湾十大功劳是特有种。该区主要类群有豆科、大戟科、蔷薇科、芸香科，并以冬青属（*Ilex*）、山茶属、山矾属（*Symplocos*）种类最多。

第四类：仅有海南 1 个地区。海南地处热带北缘，属于热带季风气候，光温充足，热带物种十分丰富。海南是中国第二大岛屿，陆地面积较小，琼州海峡将该区与大陆隔离，导致与其它地区的物种相似距离较远。该区亚麻酸资源植物到达 253 种，特有种有 10 种，包括海南大戟（*Euphorbia hainanensis*）、海南美登木（*Maytenus hainanensis*）、矮琼棕（*Chuniophoenix nana*）、海南暗罗（*Polyalthia laui*）等。该地区以大戟科、豆科、棕榈科（Palmae）、茜草科（Rubiaceae）等为主，并以芸苔属、野桐属（*Mallotus*）、杜英属（*Elaeocarpus*）种类最多。

第五类：华东地区，包括安徽、江苏、江西、浙江 4 个地区。属于亚热带湿润性季风气候和温带季风

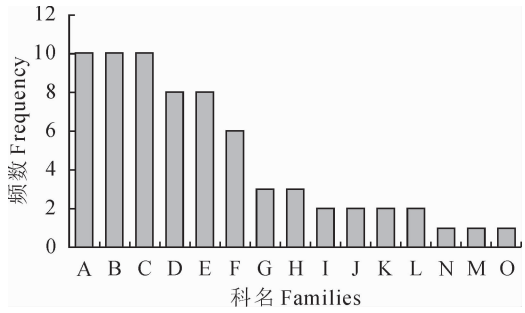
气候，气候以淮河为分界线，淮河以北为温带季风气候，以南为亚热带季风气候，气候多样。该区地形以丘陵、盆地、平原为主。共有亚麻酸资源植物460余种，如：短叶罗汉松（*Podocarpus macrophyllus*）、浙江润楠（*Machilus chekiangensis*）、夏蜡梅（*Calycanthus chinensis*）、光叶海桐（*Pittosporum glabratum*）等，其中浙江润楠、夏蜡梅为该区特有种。该区以豆科、蔷薇科、唇形科为主，其中冬青属、花椒属（*Zanthoxylum*）、芸苔属种类最多。

第六类：只有福建1个地区。福建靠近北回归线，季风气候显著，温暖湿润。全省气温季节变化不一，福州—永春—漳平—上杭一线以北，四季分明，此线以南，全年只热凉二季，即夏季，春秋合一季，基本无冬。全省以常绿阔叶林为主[36]。该区亚麻酸资源植物较丰富，共有410种，达到总数的一半多。分布着福建石楠（*Photinia fokienensis*）、紫楠、刺蒴麻（*Triumfetta rhomboidea*）、秋枫（*Bischofia javanica*）等亚麻酸资源植物。豆科、大戟科、蔷薇科等是该区分布较广泛的科，冬青属、花椒属、安息香属（*Styrax*）等是该区主要类群。

第七类：华中北部地区，包括四川和湖北2个地区。该区以亚热带季风气候为主。该区的两省之间的亚麻酸资源植物种类联系紧密，共有种很多（354种）且该区种类丰富，达到502种，占总数的61%，如四川虎刺（*Damnacanthus officinarum*）、川萼连蕊茶（*Camellia rosthorniana*）、紫苏、宜昌女贞（*Ligustrum strongylophyllum*）等。豆科、大戟科、蔷薇科等是该地区主要的科，占很大的比例。荚蒾属（*Viburnum*）、花椒属、冬青属是该区的主要类群。

第八类：华中南部地区，包括贵州和湖南2个地区。属于亚热带季风湿润气候，气候温和，雨水充足。由于贵州处于中国高原山地地区，垂直地带性明显，生态系统类型多样，导致该区亚麻酸资源植物丰富。该区共有523种亚麻酸资源植物，其中有370种是两地共有种，所以该区联系较为紧密，聚为一类。如贵州连蕊茶（*Camellia costei*）、湘楠（*Phoebe hunanensis*）、尖萼厚皮香（*Ternstroemia luteoflora*）等。豆科、大戟科、蔷薇科等是该地区主要的科，荚蒾属、花椒属、山茶属是主要类群。

第九类：华南地区，包含广东和广西2个地区。该区是中国光、热、水最丰富的地区之一，分别属于东亚季风区、亚热带季风区。该分布区亚麻酸资源植物丰富，有569种，达到总数的69%。广东和广西的相似性很大，两省区有456种是共有种，故将其聚为一类。该区分布的特有种有赛短花润楠（*Machilus parabreviflora*）、岭南山竹子（*Garcinia oblongifolia*）、茸荚红豆（*Ormosia pachycarpa*）。大戟科、豆科、芸香科、樟科（Lauraceae）是该地区主要的科，占比例很大。



A. 唇形科；B. 大戟科；C. 豆科；D. 蔷薇科；E. 芸香科；F. 十字花科；G. 葫芦科；H. 樟科；I. 茜草科；J. 桑科；K. 山茶科；L. 棕榈科；M. 壳斗科；N. 忍冬科；O. 卫矛科

图4 中国亚麻酸资源主要类群分布图

A. Lamiaceae；B. Euphorbiaceae；C. Fabaceae；D. Rosaceae；E. Rutaceae；F. Brassicaceae；G. Cucurbitaceae；H. Lauraceae；I. Rubiaceae；J. Moraceae；K. Theaceae；L. Arecaceae；M. Fagaceae；N. Caprifoliaceae；O. Celastraceae

Fig. 4 Distribution map of the main groups of Linolenic acid resources in China

第十类：只包含云南1个地区。该地区是高海拔地区，地形十分复杂，山脉重峦叠嶂，气候的立体变化和经度变化明显，形成显著的垂直地带性，生态系统类型多样，使得该区亚麻酸资源植物种类十分丰富，共有550种，达到总数67%，其中该区特有亚麻酸资源植物较多，有16种，如怒江冷杉（*Abies nukiangensis*）、云南含笑（*Michelia yunnanensis*）、滇南美登木（*Maytenus austroyunnanensis*）、云南香橼（*Citrus medica* L. var. *yunnanensis*）、滇榄（*Canarium strictum*）等，所以云南与其他地区联系较远，分为一类。

通过亚麻酸资源主要类群分布图可知（图4），唇形科、大戟科、豆科、蔷薇科、十字花科、葫芦科、樟科等15个科是亚麻酸资源分布的主要类群，其中前6科在划分的十大分区中出现频数超过了6次且唇形科、大戟科、豆科在十大分布区中都有分布，可见它们不仅是亚麻酸资源分布的主要类群，而且也是分布较广泛的类群。

3 讨 论

3.1 中国亚麻酸资源植物分布格局的主要特点及成因

应俊生对中国种子植物的研究结果表明，横断

山脉地区、华中地区和岭南地区的植物多样性和特有性程度都很高，其中横断山脉地区尤为突出[5]。李果对中国裸子植物丰富度分布格局研究[15]、张殷波对中国野生兰科植物分布格局研究[37]以及严岳鸿等对中国蕨类植物多样性与地理分布研究都出现类似的结果[34]。本研究结果表明，亚麻酸资源植物的分布格局与中国种子植物、蕨类植物、野生兰科植物和裸子植物在水平分布格局大致相吻合。而在垂直方向上，中国亚麻酸资源植物随着海拔的升高先增加后降低，呈现单峰形式。这种格局是植物丰富度随海拔分布最为普遍的趋势。Grytnes 利用尼泊尔喜马拉雅山积累的资料研究了植物物种多样性随海拔梯度的变化规律，结果表明物种多样性与海拔梯度的关系：随着海拔的升高，物种多样性先增加后减少，在中海拔地区达到最高，同时峰值偏向低海拔[38]。Md Nor 对 Kinabalu 山中的兰科植物、裸子植物以及蕨类植物研究中也出现的类似格局，只是出现单峰的海拔略有不同[39]。王国宏对中国干旱区的祁连山植物研究中也发现物种多样性具有单峰形式[40]，Rahbek C 的研究[41]以及严岳鸿等对中国蕨类植物多样性与地理分布研究都发现了相似的格局[34]。

主成分分析结果表明：气候因子中相对湿度、年均温、年降雨量对于亚麻酸资源植物的丰富对影响很大，是导致中国亚麻酸资源植物分布格局的主要因素，且与亚麻酸资源植物丰富度都成正相关，纬度、年辐射量、平均海拔等因子成负相关。地形因子中海拔标准差和表面积与投影面积之比等是影响亚麻酸植物多样性的一个独立因子，地形条件复杂是导致亚麻酸植物种类越丰富的重要原因。这与冯建孟[14]研究中国种子植物多样性分布格局与气候关系的结果基本吻合。

综合来看，西南地区年将雨量丰富都达到1 000 mm 以上、年均温适中、地形复杂等多个因子导致亚麻酸资源植物最为丰富，而新疆、甘肃、宁夏等西北地区不足 500 mm，这是导致该区资源较少的主要原因。表面积与投影面积之比可以反映出地形的复杂性，从而在一定程度上反映亚麻酸资源植物的丰富度。东北地区 1 月均温很低达到 −10 ℃以下，且年降雨量、表面积与投影面积之比较小，这些因素导致该区域亚麻酸资源植物种类较少。华东、华南地区较少的主要原因是表面积与投影面积之比较小，如海南是 5 908.45、安徽是 3 844.04、江苏只有 553.23 而云南达到 18 171.32。在垂直方向上，一方面，中海拔地区的降水量最丰富，因而有最适宜的生境[40]，而高海拔地区和干旱区域中的低海拔地区的低温环境是导致中国亚麻酸资源植物分布格局的主要因素。另一方面，人类对低海拔环境和植物的破坏以及物种多样性估算方法也是导致该格局的因素，如在统计物种分布时是通过物种的分布区间来获取不同海拔段的物种数，而低估了研究区上下限附近的物种数[38]，然而，由于基础数据的相对不足这种结果也在所难免，只能有赖于以后研究中的不断补充和完善。

3.2　亚麻酸资源植物分布格局与种子植植物分布的关系

关于种子植物的分布，应俊生的研究结果[5]与本研究所得出的中国亚麻酸资源植物分布格局大体一致，即西南地区资源最为丰富，华中和岭南地区较为丰富。导致这种结果的原因，一方面是因为亚麻酸资源植物从属于种子植物的一部分，其分布必然受到种子植物分布格局的限制，另一方面是因为亚麻酸成分的形成和积累很可能与种子植物起源与演化具有某种相关性，亦即亚麻酸的形成与积累与种子植物的系统演化有关，这为研究中国种子植物系统演化提供了新的思路和线索。当然，这种相关性及机制还有待多学科研究阐明。

在区系地理方面，吴征镒[24]将中国种子植物划分为 4 个区、7 个亚区、24 个地区、49 个亚地区，这与本研究通过聚类将中国各省区亚麻酸资源植物划归为十类的方案不太一致。出现两种结果的原因，一方面可能是因为本研究对象仅为含亚麻酸较丰富的资源植物（816 种）而中国种子植物种类达到 27 268 种[42]，种数的不同一定程度上必然导致结果的差异，另一方面，可能是由于在资源植物聚类分析中很难将区系地理成分内容直接纳入分析范畴，而更多的只是考虑到资源种类的相似性。比如海南和台湾各自独立成一类，这可能是亚麻酸资源植物种类数量较少且为岛屿有关。福建从华东地区分出独立成一类的原因也有待进一步研究。

参考文献：

[1] MACKINNON J, SHA M, CHEUNG C, *et al*. Melville DA Biodiversity Review of China[M]. Hong Kong: WWF International, 1996.

[2] 沈泽昊，张新时. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释[J]. 植物分类学报，2000，**38**(4)：366-380
SHEN Z H, ZHANG X S. A quantitative analysis on the floristic elements of the Chinese subtropical region and their spatial patterns[J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2000, **38**(4): 366-380.

[3] 周广胜，张新时. 中国气候-植被关系初探[J]. 植物生态学报，1996，**20**(2)：113-119.
ZHOU G S, ZHANG X S. Study on Chinese Climate - Vegetation Relationship[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, **20**(2): 113-119.

[4] 宋永昌. 中国东部森林植被带划分之我见[J]. 植物学报，1999，**41**(5)：541-552.
SONG Y C. Perspective of the vegetation zonation of forest region in eastern China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, **41**(5): 541-552.

[5] 应俊生. 中国种子植物物种多样性及其分布格局[J]. 生物多样性，2001，**9**(4)：393-398.
YING J S. Species diversity and distribution pattern of seed plants in China[J]. *Biodiversity Science*, 2001, **9**(4): 393-398.

[6] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律[J]. 生物多样性，2004，**12**(1)：1-4.
FANG J Y. Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains[J]. *Biodiversity Science*, 2004, **12**(1): 1-4.

[7] QIAN H, WANG S L, HE J S, *et al*. Phytogeographical analysis of seed plant genera in China[J]. *Annals of Botany*, 2006, **98**(5): 1073 - 1084.

[8] 拉 琼，扎西次仁，朱卫东，等，雅鲁藏布江河岸植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性，2014，**22**(3)：337-347.
LA Q, ZHA X C R, ZHU W D, *et al*. Plant species-richness and association with environmental factors in the riparian zone of the Yarlung Zangbo River of Tibet, China[J]. *Biodiversity Science*, 2014, **22**(3): 337-347.

[9] 冯建孟，徐成东. 云南南滚河自然保护区种子植物分布区类型多样性的垂直分布格局[J]. 西南大学学报·自然科学版，2008，**30**(1)：46-50.
FENG J M, XU C D. Altitudinal Patterns of Diversity of Floristic Distribution Types in Nangunhe Nature Reserve, Yunnan, China[J]. *Journal of Southwest University* (Natural Science Edition), 2008, **30**(1): 46-50.

[10] 王志恒，陈安平，朴世龙，等. 高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的变化[J]. 生物多样性，2004，**12**(1)：82-88.
WANG Z H, CHEN A P, PIAO S L, *et al*. Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2004, **12**(1): 82-88.

[11] 杜丽侠，邢韶华. 北京八达岭地区灌木群落空间分布格局与土壤环境因子的关系分析[J]. 西北植物学报，2009，**29**(3)：601-607.
DU L X, XING S H. Relationship between Spatial Distribution Pattern of Shrub Community and Environmental Factors in Badaling of Beijing[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin*, 2009, **29**(3): 601-607.

[12] 冯建孟，王襄平，方精云. 云南独龙江地区种子植物物种多样性垂直分布格局和云南独龙江地区种子植物物种多样性垂直分布格局和 Rapoport[J]. 北京大学学报. 自然科学版，2006，**1**(1)：1-6.
FENG J M, WANG R P, FANG J Y. Altitudinal Pattern of Species Richness and Test of the Rapoport's Rules in the Drung River Area, Southwest China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **1**(1): 1-6.

[13] 沈泽昊，张新时. 中国裸子植物物种丰富度空间格局与多样性中心[J]. 植物学报，2000，**42**(10)：1089-1095.
SHEN Z H, ZHANG X S. The Spatial Pattern and Topographic Interpretation of the Forest Vegetation at Dalaoling Region in the Three Gorges[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, **42**(10): 1089-1095.

[14] 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[J]. 生物多样性，2008，**16**(5)：470-476.
FENG J M. Spatial patterns of species diversity of seed plants in China and their climatic explanation[J]. *Biodiversity Science*, 2008, **16**(5): 470-476.

[15] 李 果，沈泽昊，应俊生，等. 中国裸子植物物种丰富度空间格局与多样性中心[J]. 生物多样性，2009，**17**(3)：272-279.
LI G, SHEN Z H, YING J S, *et al*. The spatial pattern of species richness and diversity centers of gymnosperm in China[J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(3): 272-279.

[16] 张殷波，马克平. 中国国家重点保护野生植物的地理分布特征[J]. 应用生态学报，2008，**19**(8)：1 670-1 675.
ZHANG Y B, MA K P. Geographic distribution characteristics of the national key protected wild plants in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(8): 1670-1675.

[17] ZHU H, MA Y X, Y L C, *et al*. The relationship between geography and climate in the generic-level patterns of Chinese seed plants[J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2007, **45**(2): 134-166.

[18] 曹 雪，刘稼骏. 植物油中的 α-亚麻酸和 γ-亚麻酸的测定[J]. 中国粮油学报，2006，**21**(6)：174-176.
CAO X, LIU J J. Determination of α- linolenic Acid and γ - linolenic Acid in Vegetable Oil by Gas Chromatography[J].

Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2006，**21**(6)：174-176.

[19] 赵晓燕，马　越. 亚麻酸的研究进展[J]. 中国食品添加剂，2004，(1)：27-29.
ZHAO X Y，MA Y. The Advancement of Linolenic Acid[J]. *China Food Additives*，2004，(1)：27-29.

[20] BERRY E M，HIRSEH J. Dose dietary linolenic acid in flunence blood pressure[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*，1986，**44**(3)：336-340.

[21] ZHAO G X，ETHERTON T D，MARTIN K R，*et al*. Dietary α-linolenic acid reduces inflammatory and lipid cardiovascular risk factors in hypercholesterolemic men and women[J]. *Human Nutrition and Metabolism*，2004，**134**(11)：2 991-2 997.

[22] 董杰明，吴瑞华，袁昌鲁，等. γ-亚麻酸的保健作用[J]. 卫生研究，2003，**32**(3)：299-301.
DONG J M，HU R H，YUAN C L，*et al*. Health effects of γ-linolenic acid[J]. *Journal of Hygiene Research*，2003，**32**(3)：299-301.

[23] SHAHIDI F，MIRALIAKBARI H. Omega-3 (n-3) fatty acids in health and disease：part 2-health effect of omega-3 fatty acids in autoimmune disease，mental health and gene expression[J]. *Journal of Medicine Food*，2005，**8**(2)：133-148.

[24] 吴征镒. 中国种子植物区系地理[M]. 北京：科学出版社. 2011.

[25] 中国科学院《中国自然地理》编委会. 中国自然地理・地貌[M]. 北京：科学出版社，1995.

[26] 方精云. 也论我国东部植被带的划分[J]. 植物学报，2001，**43**(5)：522-533.
FANG J Y. Re-discussion about the forest vegetation zonation in eastern China[J]. *Acta Botanica Sinica*，2001，**43**(5)：522-533.

[27] 中国植被编委会. 中国植被[M]. 北京：科学出版社，1980.

[28] Editorial Committee of Flora of China. Flora of China[M]. Beijing：Science Press，2003-2007.

[29] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京：科学出版社，1959-1004.

[30] 覃海宁. 中国科学院植物研究所中国数字植物标本馆[EB/OL]. [2013-08-06]. h t t p：//www. cvh. org. cn.

[31] 贾良智，周　俊. 中国油脂植物[M]. 北京：科学出版社，1987.

[32] 朱太平. 中国资源植物[M]. 北京：科学出版社，2007.

[33] 邢福武. 中国科学院华南植物园非粮柴油能源植物及相关微生物专题网站数据库[EB/OL]. [2013-06-06]. http：//csdb. cep. ac. cn/Search. aspx.

[34] 严岳鸿，张宪春，马克平，等. 中国蕨类植物多样性与地理分布[M]. 北京：科学出版社，2013.

[35] 蒋志刚，韩兴国，马克平. 保护生物学[M]. 杭州：浙江科技出版社，1997.

[36] 姜必亮，张宏达. 福建种子植物区系地理研究[J]. 广西植物，2000，**20**(2)：117-125.
JIANG B L，ZHANG H D. Floristic study of spermatophyte of Fujian province[J]. *Guihaia*，2000，**20**(2)：117-125.

[37] 张殷波，杜昊东，金效华，等. 中国野生兰科植物物种多样性与地理分布[J]. 科学通报，2014，**60**(2)：179-188.
ZHANG Y B，DU H D，JIN X H，*et al*. Species diversity and geographic distribution of wild Orchidaceae in China[J]. *Science China Press*，2014，**60**(2)：179-188.

[38] GRYTNES J A，VETAAS O R. Species richness and altitude：a comparison between Null models and interpolated plant species richness along the Himalayan altitudinal gradient，Nepal[J]. *American Naturalist*，2002，**159**(3)：294-304.

[39] MD NOR S. Elevational diversity patterns of small mammals on Mount Kinabalu，Sabah，Malaysia[J]. *Global Ecology and Biogeography*，2001，**10**(1)：41-62.

[40] WANG G H，ZHOU G S. Distribution Species Diversity and Life-form Spectra of Plant Communities Along an Altitudinal Gradient in the Northern Slopes of Qilianshan Mountains，Gansu，China[J]. *Plant Ecology*，2002，**165**(2)：169-181.

[41] RAHBEK C. The Elevational Gradients of Species Richness：a Uniform Pattern[J]. *Ecography*，1995，**18**(2)：200-205.

[42] 李锡文. 中国种子植物区系统计分析[J]. 云南植物研究，1996，**18**(4)：363-384.
LI X W，Floristic Statistics and Analyses of Seed Plants for China[J]. *Acta Botanica Yunnanica*，1996，**18**(4)：363-384.

（编辑：潘新社）