

云南引种印楝实生栽培种群表型的地理变异

彭兴民, 吴疆翀, 郑益兴, 张燕平

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224)

摘要:采用形态学标记,按照完全随机设计和巢式设计,沿印楝云南分布区的纬度和海拔梯度布点调查和采样,测量9个种群90个单株14个形态性状,运用多元统计分析方法,揭示云南分布区印楝表型的地理变异格局。结果表明:印楝种内表型性状在种群间和种群内个体间均存在着较丰富的差异。营养性状变异与年平均气温(21.7~24.8℃)呈显著正相关,与海拔(197.0~1277.0m)和纬度(23°06'N~25°48'N)呈显著负相关,空间分布上呈现纬向的单向变异模式;繁殖性状变异与年平均气温、年降水量(634.0~1060.0mm)、经度(101°51'~103°11'E)呈显著正相关,与海拔和纬度呈显著负相关,空间分布上呈现经向和纬向的双向变异模式。9个种群两两间的遗传距离系数(欧氏距离系数)分布在2.44~8.16间。Mantel检测发现,种群间遗传距离与两两种群所在地的地理距离($R=0.28209, P=0.9463$)、气温差值($R=0.45666, P=0.9993$)和年降水量差值($R=0.23326, P=0.9243$)的相关性不显著,而与两两种群所在地的海拔间距($R=-0.41703, P=0.0032$)呈显著负相关,海拔差异在其种群分化中产生了作用,种群生境的异质性影响种群的遗传分化。

关键词:印楝;栽培种群;地理变异格局;环境因子;多元分析

中图分类号:S792.33

文献标识码:A

Geographic Variation of Morphological Characters among Cultivated Neem (*Azadirachta indica*) Populations in Yunnan, China

PENG Xing-min, WU Jiang-chong, ZHENG Yi-xing, ZHANG Yan-ping

(Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: By means of morphological markers with completely random design and nest design, the geographic variation pattern of the morphological characters of neem (*Azadirachta indica*) was revealed. Sampled at level of 90 individuals, 9 populations, 14 phenotypes along gradients of latitude and altitude, and analyzed by multivariate statistics, the results are as follows: The variations existed both among populations and within population. The nutrient characters were positively correlated to the annual mean temperature (21.7—24.8℃), and negatively correlated to altitude (197.0—1277.0 m) and latitude (23°06' N—25°48' N), with space distribution along latitude; The reproductive characters were positively correlated to the annual mean temperature, annual rainfall (634.0—1060.0 mm) and longitude (101°51'—103°11' E), and negatively correlated to altitude and latitude, with space distribution along latitude and longitude. Euclid's genetic distance between populations ranged from 2.44 to 8.16. Mantel test showed that the genetic distance among populations was not significantly correlated to the geographic distance ($R=0.28209, P=0.9463$), difference of temperature ($R=0.45666, P=0.9993$) and difference of annual rainfall ($R=0.23326, P=0.9243$), but was negatively correlate to difference of altitude ($R=-0.41703, P=0.0032$), suggesting that the altitude (with heterogeneous environment) might affect the genetic differentiation of populations.

收稿日期:2012-03-27

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD21B04)和“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B0302)

作者简介:彭兴民(1962—),男,高级工程师;研究方向:植物引种、种质创新与新品种选育。E-mail:pengxgong007@21cn.com

Key words: *Azadirachta indica*; cultivated populations; geographic variation pattern; environment factor; multivariate analysis

林木种群表型变异研究是一个传统的研究领域,以植物表型作为遗传标记即形态学标记(Morphological Markers),简单直观,容易观察记载,而且表型变异代表了整个植株水平的变异,并能初步了解类群遗传变异的大小;也有助于了解生物适应和进化的方式、机制及其影响因素,是研究遗传变异的有效手段之一,也是人工驯化和遗传育种研究的基础^[1-2]。印楝(*Azadirachta indica* A. Juss.)为楝科(Meliaceae)常绿乔木,是南亚和东南亚热带干旱地区的特有树种,具有富含杀虫杀菌活性物质、抗病虫性强、耐高温、耐旱、寿命长等特性,能在全球防治病虫害、提供药原料、计划生育、减少水土流失、增加森林植被和防止温度变暖方面开创新的纪元^[3]。我国无印楝自然分布,规模化引种始于20世纪末,在云南、四川、海南等省的干热河谷地区有栽培分布,但云南栽培分布面积最大^[4-5]。国内外关于印楝表型变异研究,印楝素、印楝油形成和积累的种属^[6-7]、种源或种群^[8-10]、个体^[11-16]、器官和生长发育期^[17-19]的特异性已有研究。在已有研究中鲜见表型性状与地理距离相关性研究,缺乏种群间遗传距离与地理距离的关系分析。本研究以云南分布区内的9个种群90个单株14个形态性状为材料,着重分析表型性状与地理环境因子的相关性,尤其是种群间的遗传距离与地理距离、海拔、气温及降水量的关系,阐明其地理变异格局,为印楝资源的评价、保护、保存、遗传改良提供科学理论依据,同时也为印

楝种子印楝素的积累、代谢和调控研究奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 样地概况及取样

供选印楝人工林:1997年7月中旬由缅甸木各具(Pakokku, Myanmar)引入种子,当月育苗,育苗容器为12 cm × 18 cm 塑料营养袋;1998年7月植苗定植,穴规格:60 cm × 60 cm × 60 cm,株行距4 m × 4 m。2003—2004年全面收集云南印楝分布资料和实地调查,选取楚雄州元谋县和红河州红河、元阳、个旧等县(市)的印楝人工林进行调查,确定研究样地:即元谋县黄瓜园镇小丙岭村(XBL)、元马镇马街村万兴公司(WX)、老城乡南门山村(NMS);红河县迤萨镇大黑公村(DHG),元阳县马街乡乌湾村(WW)、南沙镇南沙村(NS)、上新城乡蛮堤村(MT),个旧市保和乡冷墩村(LD)、蔓耗镇黄草坝村(HCB)。2007年8月对印楝9个种群进行取样。取样种群的面积依种植地块大小而定,一般不少于1.0 hm²。在选定的种群内各随机选择10株生长正常、无明显病虫害的植株,株间水平距离5倍株高以上,既保证取样均匀性,又最大限度降低样本植株间的亲缘关系。每个采样植株都采用全球卫星定位系统(GPS)定位,挂牌标记以便于跟踪调查。取样种群的基本概况见表1。

表1 印楝取样种群概况

种群编号及农业生态气候区	种群	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	年平均气温/℃	年降水量/mm	果实成熟期(月)	生境
P1a	XBL	25°48′	101°51′	1 135.0	21.7	645.0	8—9	农田旁
P2a	WX	25°44′	101°52′	1 120.2	21.8	634.0	8—9	新垦台地
P3a	NMS	25°37′	101°53′	1 277.0	20.9	645.0	8—9	较陡荒坡
P4b	DHG	23°19′	102°34′	553.0	22.8	843.0	7—8	平缓荒坡
P5b	WW	23°18′	102°38′	430.0	23.5	840.0	7—8	平缓荒坡
P6b	NS	23°13′	102°50′	257.1	24.5	945.8	7—8	耕地
P7b	LD	23°12′	102°55′	223.0	24.7	945.8	7—8	洪积台地
P8b	MT	23°08′	103°03′	197.0	24.8	980.0	7—8	平缓荒坡
P9b	HCB	23°06′	103°11′	256.0	24.5	1 060.0	7—8	平缓荒坡

注:a,亚热带气候区;b,热带气候区。DHG,大黑公;HCB,黄草坝;LD,冷墩;MT,蛮堤;NMS,南门山;NS,南沙;WW,乌湾;WX,万星;XBL,小丙岭。年平均气温根据采样点所在县的气候站数据推算,海拔每升高100 m,气温下降0.6℃。

1.2 形态性状的选取及测定方法

选择遗传相对稳定、易于获得和测定的形态性状,包括:树高(SG)、枝下高(ZG)、地径(DJ)、冠幅(GF)、株产果实数(GS)、种子长(SL)、种子宽(SW)、种子长宽比(SLW)、种子粒质量(ST)、种仁粒质量(KT)、出仁率(SKT)、种仁印楝素A含量(azA)、印楝素B含量(azB)和印楝素A、B的总含量(azAB),共计14个性状。用测杆、皮尺量测树高、枝下高、冠幅,用游标卡尺量测地径;株产果实数的估测方法:在东、西两面树冠的上、中、下3个位置各选3个能代表结果状况的样枝,统计果实数,计算平均每个样枝的果实数,统计植株的结果枝数,用“株产果实数=结果枝数×样枝果实数”算式计算株产果实数;果实成熟中期,8:00—12:00时在树冠南面的中部采样,分株采收、存放,约500粒·株⁻¹,过熟果(果皮变黄)不采,只采青色果,采下青色果存放2d,拣变黄变软的果实调制,青色、硬果除去,人工清洗,自然风干,保存于冰箱冷藏室(4℃左右)待用;采用GB/T3543.7-1995的百粒四分法随机抽取30粒种子,用游标卡尺测量种子长、种子宽,测量精度0.1mm,计算种子长宽比;用1/10000天平称量种子粒质量和种仁粒质量,称量精度为0.01g,随机抽取10粒种子,称质量,剥去外种皮,再称10粒种仁质量,30次重复,取平均数换算成种子和种仁的粒质量,计算出仁率;用宗乾收等^[20]提出的“印楝种仁

中印楝素含量的快速液相色谱分析法”分析印楝素含量,样品检测人员和检测仪器固定。

1.3 形态性状数据的处理和分析

印楝形态性状的特征量中大部分特征量服从正态分布,但株产果实数的大小相差太大;种子长宽比偏态分布,出仁率、种仁印楝素含量、变异系数是百分数,都偏离正态分布。根据特征量性质,株产果实数采用平方根转换;出仁率、种仁印楝素含量及变异系数采用平方根反正弦转换。常用描述统计量的计算和非正态分布数据转换采用Microsoft Office Excel2003软件;方差分析、相关分析采用SAS(9.0)软件;种群间的地理距离的估算采用Earth Explorer 4.6软件;遗传相似/异系数矩阵和地理距离矩阵、海拔间距矩阵、温度差值矩阵、降水量差值矩阵的计算和Mantel test检验采用NTSYS PC 2.11e软件(Applied Biostatistics Inc., Setauket, USA)。

2 结果与分析

2.1 表型性状变异分析

印楝14个表型性状中,除种子长宽比和种子出仁率两性状在种群间无差异外($P > 0.05$),其余性状在种群间和种群内个体间都存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的差异;种群间的 F 值变幅为12.90~2.34,平均5.56(表2)。

表2 印楝种群间和种群内表型性状方差分析

性状	均方(自由度)			F	
	种群间	种群内	随机误差	种群间	种群内
SL	0.812 22(8)	0.312 09(81)	0.034 24(2 610)	2.60*	9.11**
SW	0.163 71(8)	0.073 80(81)	0.011 23(2 610)	2.22*	6.57**
SLW	1.963 30(8)	1.423 86(81)	0.248 54(2 610)	1.38 ^{ns}	5.73**
ST	0.079 85(8)	0.034 14(81)	0.001 66(2 610)	2.34*	20.50**
KT	0.026 65(8)	0.006 92(81)	0.000 48(2 610)	3.85**	14.40**
SKT	1.734 04(8)	1.395 02(81)	0.418 79(2 610)	1.24 ^{ns}	3.33**
SG	16.363 25(8)	1.268 92(81)	—	12.90**	—
ZG	1.452 89(8)	0.197 30(81)	—	7.36**	—
DJ	52.025 25(8)	16.602 21(81)	—	3.13**	—
GF	23.587 69(8)	3.184 17(81)	—	7.41**	—
GS	1 413.315 23(8)	337.281 91(81)	—	4.19**	—
azA	81.030 26(8)	20.198 34(81)	—	4.01**	—
azB	63.611 79(8)	6.317 34(81)	—	10.07**	—
azAB	258.314 78(8)	40.468 27(81)	—	6.38**	—

注:azA,印楝素A含量;azAB,印楝素A+B总含量;azB,印楝素B含量;DJ,地径;GF,冠幅;GS,株产果实数;KT,种仁粒质量;SG,树高;SKT,出仁率;SL,种子长;SLW,种子长宽比;ST,种子粒质量;SW,种子宽;ZG,枝下高。* $p < 0.01$; * $p < 0.05$; ^{ns},不显著。—,该值不存在。

2.2 表型性状与地理环境因子的相关性

表3显示了各表型性状与地理环境因子间的相关性。树高、枝下高、冠幅和株产果实数等营养性状与地理环境因子相关密切,树高和株产果实数受年平均气温、海拔、纬度影响($P < 0.05$),枝下高受年平均气温、海拔影响($P < 0.05$),冠幅受海拔、纬度影响($P < 0.05$),其中,营养性状对年平均气温的反应更灵敏(树高、株产果实数、枝下高与年平均气温相关值分别为0.753 6、0.728 1、0.728 5;营养性状与年平均气温呈显著正相关,与海拔和纬度呈显著负相关,有随年平均气温升高而增大、随海拔升高和纬度增大而减小趋势。种子(仁)粒质量和种子长等繁殖性状与地理环境因子相关密切,种子(仁)粒质量受年平均气温、海拔、年降水量、纬度和经度影响($P < 0.05$),种子长受海拔、年平均气温影响($P < 0.05$),其中,繁殖性状对年平均气温的反应更灵敏(种子粒质量、种仁粒质量、种子长与年平均气温相关值分别为0.890 1、0.774 1、0.789 5);繁殖性状与年平均气温、年降水量、经度呈显著正相关,与海拔和纬度呈显著负相关,有随年平均气温升高和年降

水量、经度增大而增大,随海拔升高和纬度增大而减小趋势。种子印楝素含量、出仁率和种子宽、种子长宽比性状则与生态因子相关不显著。

2.3 种群间的遗传距离与地理距离的关系

9个种群两两间的遗传距离系数(欧氏距离系数)(表4对角线下半部分)显示:9个种群两两间的遗传距离系数分布在2.44~8.16间,其中,冷墩和万星的遗传距离系数最大,为8.16,表明2种群间的遗传相似性最小;黄草坝和小丙岭之间的遗传距离系数最小,为2.44,表明2种群间的遗传相似性最大。

将聚类结果转换为协表征矩阵或地理距离矩阵(表4对角线上半部分),对协表征矩阵与相似系数矩阵(表4对角线下半部分)的相关性进行Mantel's test检验(Mantel, 1967)(图1左图)。结果表明:2种矩阵极相关系数 $R = 0.688\ 91$,说明有68.891%的表型变异可以由地理距离解释,31.109%的表型变异是由其他因素决定的;但印楝9个栽培地理种群间的地理距离和遗传距离系数相关性不显著($P = 0.998\ 8 > 0.05$)。

表3 印楝表型性状与地理因子的 Pearson 相关系数(R)和显著性概率(p)值

性状	相关系数和显著性概率	纬度(N)	经度(E)	海拔	年平均气温	年降水量
SL	R	-0.640 8	0.655 7	-0.741 3	0.789 5	0.626 6
	p	0.062 9	0.055 1	0.022 2	0.011 4	0.070 9
SW	R	-0.335 1	0.260 6	-0.283 2	0.237 8	0.271 5
	p	0.378 0	0.498 2	0.460 2	0.537 7	0.479 6
SLW	R	-0.187 3	0.238 6	-0.302 5	0.371 7	0.201 8
	p	0.629 4	0.536 3	0.428 8	0.324 5	0.602 4
ST	R	-0.787 8	0.811 7	-0.864 3	0.890 1	0.787 8
	p	0.011 7	0.007 9	0.002 6	0.001 3	0.011 7
KT	R	-0.615 1	0.682 2	-0.713 0	0.774 1	0.675 5
	p	0.077 8	0.042 9	0.031 0	0.014 3	0.045 8
SKT	R	0.244 6	-0.317 2	0.269 5	-0.300 6	-0.353 9
	p	0.525 8	0.405 5	0.483 1	0.431 7	0.350 0
SG	R	-0.667 6	0.601 4	-0.744 9	0.753 6	0.559 6
	p	0.049 4	0.086 6	0.021 3	0.019 0	0.117 2
ZG	R	-0.548 8	0.554 8	-0.666 3	0.728 5	0.528 4
	p	0.125 9	0.121 0	0.050 0	0.026 0	0.143 6
DJ	R	-0.616 7	0.571 4	-0.660 3	0.655 3	0.563 9
	p	0.076 9	0.108 0	0.052 9	0.055 4	0.113 8
GF	R	-0.747 9	0.583 7	-0.699 9	0.611 9	0.550 0
	p	0.020 5	0.098 9	0.035 8	0.079 9	0.124 9
GS	R	-0.681 3	0.630 9	-0.736 5	0.728 1	0.589 5
	p	0.043 3	0.068 4	0.023 6	0.026 1	0.094 8
azA	R	-0.339 3	0.233 9	-0.219 8	0.119 1	0.174 8
	p	0.371 7	0.544 5	0.569 7	0.760 1	0.652 8
azB	R	0.222 2	-0.355 2	0.334 3	-0.407 0	-0.364 1
	p	0.565 5	0.348 1	0.379 2	0.276 9	0.335 4
azAB	R	-0.142 4	0.019 6	-0.019 2	-0.075 6	-0.023 0
	p	0.714 6	0.960 0	0.960 7	0.846 6	0.953 1

注:性状代号含义同表2。

2.4 种群间的遗传距离与海拔、气温及降水量的关系

上述表型性状与地理环境因子间的相关性研究表明:印楝 14 个形态性状中树高、株产果实数、种子粒质量的变异与海拔、年平均气温的相关性显著,而

种群水平的相关性如何?表 5 所示分别为两两种群所在地的海拔间距矩阵(表 5 对角线下半部分)、年平均气温差值矩阵(表 5 对角线上半部分)和年降水量差值矩阵(表 5 双线下部分)。

表 4 9 个种群间的遗传距离系数矩阵(对角线下半部分)与地理距离矩阵(对角线上半部分)

	XBL	WX	NMS	DHG	WW	NS	LD	MT	HCB
XBL	****	4.55	12.39	268.15	270.50	279.90	282.79	308.13	314.17
WX	4.05	****	7.83	263.60	265.95	275.34	278.23	303.57	309.62
NMS	4.50	3.87	****	255.76	258.11	267.50	270.39	295.74	301.78
DHG	3.54	5.37	5.06	****	2.350	11.74	14.63	39.97	46.02
WW	3.65	5.36	5.38	4.21	****	9.39	12.28	37.62	43.67
NS	4.24	7.06	7.68	6.21	3.98	****	2.88	28.23	34.27
LD	6.35	8.16	7.60	5.53	4.00	5.74	****	25.34	31.38
MT	5.25	5.63	7.15	6.54	3.85	4.45	6.03	****	6.04
HCB	2.44	4.72	4.79	4.32	3.04	3.87	5.90	4.54	****

*注:种群代号含义同表 1。

表 5 9 个种群间的海拔间距矩阵(对角线下半部分)、气温差值矩阵(对角线上半部分)与年降水量差值矩阵(双线下部分)

	XBL	WX	NMS	DHG	WW	NS	LD	MT	HCB
XBL	****	0.1	-0.8	1.1	1.8	2.8	3.0	3.1	2.8
WX	-14.8	****	-0.9	1.0	1.7	2.7	2.9	3.0	2.7
NMS	142.0	156.8	****	1.9	2.6	3.6	3.8	3.9	3.6
DHG	-582.0	-567.2	-724.0	****	0.7	1.7	1.9	2.0	1.7
WW	-705.0	-690.2	-847.0	-123.0	****	1.0	1.2	1.3	1.0
NS	-877.9	-863.1	-1 019.9	-295.9	-172.9	****	0.2	0.3	0.0
LD	-912.0	-897.2	-1 054.0	-330.0	-207.0	-34.1	****	0.1	0.2
MT	-938.0	-923.2	-1 080.0	-356.0	-233.0	-60.1	-26.0	****	0.3
HCB	-879.0	-864.2	-1 021.0	-297.0	-174.0	-1.1	33.0	59.0	****

	XBL	WX	NMS	DHG	WW	NS	LD	MT	HCB
XBL	****								
WX	-11.0	****							
NMS	0.0	11.0	****						
DHG	198.0	209.0	198.0	****					
WW	195.0	206.0	195.0	-3.0	****				
NS	300.8	311.8	300.8	102.8	105.8	****			
LD	300.8	311.8	300.8	102.8	105.8	0.0	****		
MT	335.0	346.0	335.0	137.0	140.0	34.2	34.2	****	
HCB	415.0	426.0	415.0	217.0	220.0	114.2	114.2	80.0	****

注:种群代号含义同表 1。

对两两种群间的遗传距离矩阵与海拔间距、年平均气温差值矩阵、年降水量差值矩阵的 Mantel 检测表明:种群间遗传距离与两两种群所在地的海拔间距呈显著负相关($R = -0.417 03, P = 0.003 2 < 0.05$,图 1 右图),而与两两种群所在地的气温差值相关不显著($R = 0.456 66, P = 0.999 3 > 0.05$,图 2 右图),与两两种群所在地的年降水量差值相关也不

显著($R = 0.233 26, P = 0.924 3 > 0.05$,图 2 左图)。

3 结论与讨论

3.1 印楝表型的地理变异模式

种群在研究区域大、小空间尺度上呈现与生活史、形态和生理有关的遗传分化。本研究种群的分布区(表 1)跨热带和亚热带 2 个气候带,经度、纬

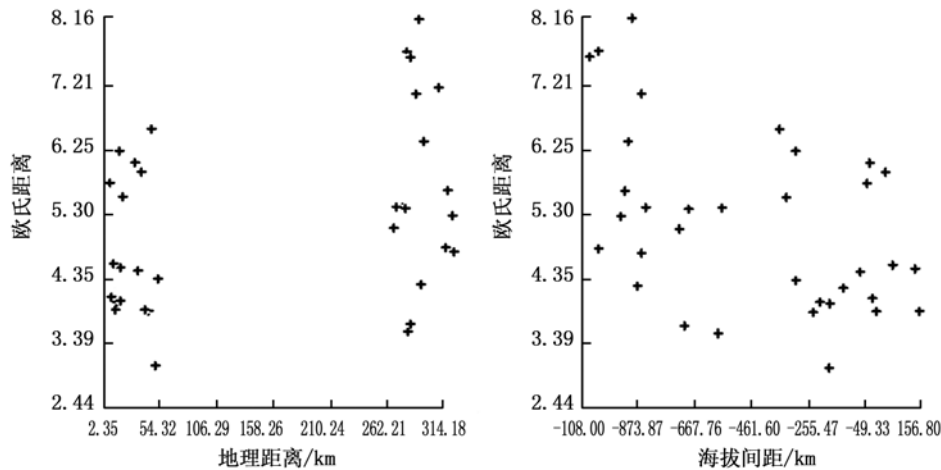


图1 遗传距离与地理距离(左)、海拔间距(右)的 Mantel 相关性检测

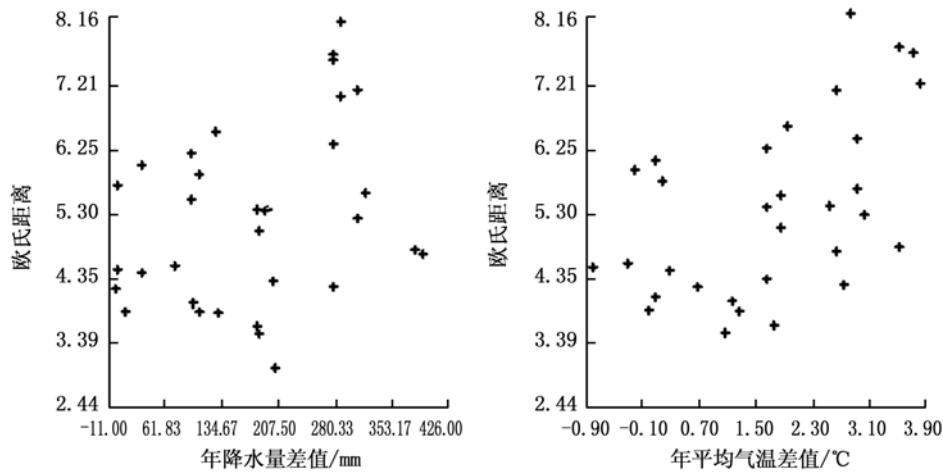


图2 遗传距离与年降水量差值(左)、年平均气温差值(右)的 Mantel 相关性检测

度、海拔、温度和年降水量的跨度分别约为 2° 、 3° 、 $1\ 000\ \text{m}$ 、 $4\ ^{\circ}\text{C}$ 和 $400\ \text{mm}$ ；有耕地、四旁地和荒地等类别；果实成熟期不同。表型性状在种群间和种群内个体间都存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 的差异(种子长宽比和种子出仁率的种群间差异除外)。树高、枝下高、冠幅和株产果实数与年平均气温呈显著正相关,与海拔和纬度呈显著负相关,空间分布上呈现纬向的单向变异模式,有随年平均气温升高而增大、随海拔升高和纬度增大而减小的趋势。种子(仁)粒质量和种子长与年平均气温、年降水量、经度呈显著正相关,与海拔和纬度呈显著负相关,空间分布上呈现经向和纬向的双向变异模式,有随年平均气温升高和年降水量、经度增大而增大,随海拔升高和纬度增大而减小的趋势。印楝实生种群间的表型分化程度高 ($V_{sr} = 0.118\ 8$)^[10], 这表明,印楝种群在研究区域大、小空间尺度上呈现与生活史、形态和生理有关的遗传分化。

3.2 印楝表型地理变异与环境之间的关系

遗传变异和地理环境之间的关系一直是植物种群遗传学研究中普遍关注的问题。本文研究的9个种群两两间的遗传距离系数分布在 $2.44 \sim 8.16$ 间。Mantel 检测发现:种群间遗传距离与两两种群所在地的地理距离相关不显著,与两两种群所在地的气温差值和年降水量差值的相关也不显著,而与两两种群所在地的海拔间距呈显著负相关。Hamrik 等^[22]认为,种群的地理分布和遗传多样性分布没有直接的相关性,本研究结果支持这一结论。种群间遗传距离与种群所在地的海拔间距呈显著负相关 ($R = -0.417\ 03, P = 0.003\ 2 < 0.05$) 即有 41.703% 的表型变异可以由海拔间距解释, 58.297% 的表型变异是由其他因素决定的,海拔差异在其种群分化中产生了作用,种群生境的异质性影响种群的遗传分化。Diez 等^[21]认为,植物性状与环境之间的联系包括植物性状与气候(包括气温、降水、光照)、地理

空间变异(包括地形地貌、生态梯度、海拔)、营养、干扰(包括火灾、放牧、生物入侵、土地利用)等环境因素之间关系。在区域尺度上,植物性状与环境之间的联系是气候、干扰和生物条件筛选效应的结果。目前,许多学者把具有广泛分布区的种内大部分变异看成是由数量性状上有变化的遗传级差,亦即梯度变异所构成,这些梯度变异的升降急剧性,以及由此产生空间分隔的“生态型”区别的明显性,取决于自然界不同气候带或环境条件之间过渡的情况——是急剧过渡还是逐渐过渡^[23]。从本文研究的9个种群看,海拔高度差异实质上是温度和年降水量的差异,分布区北缘低温低湿,分布区南缘高温高湿。种群间的海拔是急剧过渡,故种群间遗传距离与种群所在地的海拔间距呈显著负相关。种群的遗传距离系数与气温和年降水量之间没有相关性,这可能与取样点气温和年降水量梯度差异不明显有关,即可能与取样策略的影响有关。由于研究对象年龄条件限制等原因,本研究取样种群尚未包括我国引种印楝的北部边缘区的四川等省区种群,仅仅是印楝的中心分布区和南部分布区(含南部边缘区)的云南省种群,而云南分布区种群间的气温、降水是逐渐过渡,故种群的遗传距离系数与气温、降水之间也没有相关性。样本不能完全代表整个印楝分布区的印楝资源分布情况,所得到的结果也可能存在一定的误差,即取样点气温和年降水量梯度差异不明显。今后应进一步收集北部边缘地区的印楝资源,兼顾更多个地理或生态因子(包括土壤等)梯度,以进一步分析种群对更大尺度地理因子梯度的形态反应。

参考文献:

- [1] 李长喜. 林木天然种群表型变异研究概述[J]. 林业科学研究, 1988, 1(6): 657 - 664
- [2] 葛 颂, 洪德元. 遗传多样性及其检测方法[C] // 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的理论与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 123 - 140
- [3] National R C. Neem— A Tree for Solving Global Problems[M]. Washington D C. National Academy Press, 1992: 141
- [4] 彭兴民, 张燕平, 赖永祺, 等. 印楝生物学特性及引种栽培[J]. 林业科学研究, 2003, 17(1): 75 - 80
- [5] 冯沙克, 赵元藩. 云南省印楝种植及相关产业的发展现状[J]. 林业调查规划, 2007, 32(5): 79 - 82
- [6] Schmutterer H. The tree and its characteristics[C] // Schmutterer H. The Neem Tree: Source of Unique Natural Products for Integrated Pest Management, Medicine, Industry and Other Purposes. Weinheim, Germany: VCH Verlagsgesellschaft, 1995: 1 - 34
- [7] 彭兴民, 吴疆翀, 郑益兴, 等. 印楝属(*Azadirachta* A. Juss.) 植物分类及分布的研究现状[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(4): 583 - 588
- [8] Sidhu O P, Kumar V, Behl H M. Variability in Neem (*Azadirachta indica*) with respect to azadirachtin content[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 910 - 915
- [9] Kaushik N, Singh B G, Tomar U K, et al. Regional and habitat variability in azadirachtin content of Indian neem (*Azadirachta indica* A. Jusieu) [J]. Current Science, 2007, 92: 1400 - 1406
- [10] 彭兴民, 吴疆翀, 郑益兴, 等. 云南引种印楝实生种群的表型变异[J]. 植物生态学报, 2012, 36(6): 560 - 571
- [11] Momchilova S, Antonova D, Marekov I, et al. Fatty Acids, Triacylglycerols, and Sterols in Neem Oil (*Azadirachta indica* A. Juss.) as Determined by a Combination of Chromatographic and Spectral Techniques[J]. Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies, 2007, 30(1): 11 - 25
- [12] 吴疆翀, 彭兴民, 郑益兴, 等. 印楝异交率和基因流的分析[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 593 - 598
- [13] 吴疆翀, 彭兴民, 郑益兴, 等. 印楝素含量与种子形态及成熟期关系的初步研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 590 - 594
- [14] 彭兴民, 吴疆翀, 郑益兴, 等. 印楝农药原料林优树选择方法与标准[J]. 福建林学院学报, 2010, 30(3): 265 - 269
- [15] Gupta V K, Ahlawat S P, Kumar R V, et al. Effect of Season and Year on Azadirachtin A and Oil Content in Neem (*Azadirachta indica* A. juss) Seeds and Relationship of Azadirachtin A and Oil Content with Rainfall, Temperature and Humidity[J]. Current Science, 2010, 99(7): 953 - 956
- [16] Tomar U K, Singh G, Kaushik N. Screening *Azadirachta indica* tree for enhancing azadirachtin and oil contents in dry areas of Gujarat[J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 217 - 224
- [17] 张 兴, 赵善欢. 国产印楝树皮中印楝素测试初报[J]. 西北农业大学学报, 1992, 20(4): 90 - 94
- [18] Yakkundi S R, Thejavathi R, Ravindranath B. Variation of azadirachtin content during growth and storage of Neem (*Azadirachta indica*) seeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43: 257 - 259
- [19] Johnson S, Morgan E D, Peiris C J. Development of the Major Triterpenoids and Oil in the Fruit and Seeds of Neem[J]. Annals of Botany, 1996, 78: 383 - 388
- [20] 宗乾收, 林 军, 武永昆, 等. 印楝种仁中印楝素含量的快速液相色谱分析[J]. 农药, 2003, 42(4): 23 - 24
- [21] Diaz S, Cabido M, Casanoves F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale[J]. Journal of Vegetation Science, 1998, 9(1): 113 - 122
- [22] Hamrick J L, Godt M J W. Allozyme diversity in plant species[C] // Brown A H D, Clegg M T, Kahler A L. Plant Population Genetics, Breeding, and Genetic Resources. Massachusetts: Sinauer Association Inc, 1990: 43 - 63
- [23] 杨 继. 植物种内形态变异的机制及其研究方法[J]. 武汉植物学研究, 1991, 9(2): 185 - 195