

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202002023

基于灰色关联度分析的浙江楠在江苏的 适宜引种地评估*

谢春平^{1,2}, 刘大伟^{2**}, 吴显坤², 薛晓明², 南程慧²

(1. 广东海洋大学 滨海农业学院, 广东 湛江 524088;

2. 野生动植物物证技术国家林业和草原局重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要:【目的】研究浙江楠在江苏地区的适宜引种区域, 开展其气候适宜性分析。【方法】利用灰色关联度和主成分分析方法, 结合 19 个生物气候指标, 对浙江楠在江苏省各地市的引种气候适宜性进行综合评估。【结果】等权关联和综合评价模型的结果均支持将江苏 13 个地市的引种气候适宜性划分为 3 类, I 类为高适宜区 ($\lambda \geq 1.100$): 包括常州、无锡和苏州; II 类为中适宜引种区 ($0.900 \leq \lambda < 1.100$), 包括南京、镇江、扬州、泰州和南通; III 类为低适宜引种区 ($\lambda < 0.900$), 包括盐城、淮安、徐州、连云港和宿迁。【结论】江苏南部地区是浙江楠引种的较佳适宜地。

关键词: 灰色关联度; 气候适宜性; 主成分分析; 引种; 浙江楠

中图分类号: Q 949.747.508

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 02-0330-08

Evolution of the Suitable Introduction and Acclimatization Zones of *Phoebe chekiangensis* in Jiangsu Province Based on Grey Correlation Method

XIE Chunping^{1,2}, LIU Dawei², WU Xiankun², XUE Xiaoming², NAN Chenghui²

(1. College of Coastal Agricultural Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Key Laboratory of State Forest and Grassland Administration on Wildlife Evidence Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: [Purpose] To study the suitable introduction zones of *Phoebe chekiangensis* C. B. Shang, its suitable introduction and acclimatization zones was discussed in this study. [Method] Based on the methods of grey correlation and principal component analysis, combining with 19 bioclimatic indices, suitable introduction and acclimatization regions of *P. chekiangensis* in Jiangsu Province was evaluated comprehensively. [Result] It indicated that thirteen cities of Jiangsu Province should be divided into three categories of climatic suitability in light to the equal-weight correlation degree and comprehensive evaluation model. Category I (high suitable zone, $\lambda \geq 1.100$) included Changzhou, Wuxi and Suzhou; category II (moderate suitable zone, $0.900 \leq \lambda < 1.100$) included Nanjing, Zhenjiang, Yangzhou, Taizhou and Nantong; category III (low suitable zone, $\lambda < 0.900$) included Yancheng, Huai'an, Xuzhou, Lianyungang and Suqian. [Conclusion] The southern part of Jiangsu Province is a

收稿日期: 2020-02-21

修回日期: 2020-11-08

网络首发时间: 2021-03-22 14:07:28

*基金项目: 国家林业和草原局生物安全与遗传资源项目 (KJZXSA202031); 江苏省林业科技创新与推广项目 (LYKJ[2019]46)。

作者简介: 谢春平 (1980—), 男, 海南儋州人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究。

E-mail: xcp@gdou.edu.cn

**通信作者 Corresponding author: 刘大伟 (1983—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 讲师, 主要从事野生动植物保护与利用研究。E-mail: 272756332@qq.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210319.1152.001.html>



better zone for the introduction of *P. chekiangensis*.

Keywords: grey correlation; climatic suitability; principal component analysis; introduction; *Phoebe chekiangensis*

全球气候变化导致物种适宜生境丧失^[1],使物种的灭绝风险增加,尤其是对于濒危物种的影响更大^[2]。历史的经验和现实状况均表明:珍稀濒危物种需要在人类的帮助下才能得到有效的保护,迁地保护与引种扩繁是其中最主要的措施之一^[3]。水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)和香樟(*Cinnamomum camphora*)等珍稀濒危植物已在城市园林绿化中得到广泛地推广应用,其种群数量得到了可观地增长。因此,在加强就地保护的基础上,选择适宜的地点开展行之有效的迁地保护与引种扩繁对珍稀濒危植物种群的延续和物种保存至关重要^[4]。

影响物种分布的因素主要有非生物因素、生物因素以及物种的迁移能力,各种因素在不同空间尺度下发挥作用不同^[5]。在大尺度范围内,气候因素是决定植被类型及其物种分布的最主要因素^[6]。所以,科学合理地对引种目标地气候与原产地气候进行比较分析是成功引种的第一步。但是,引种目标地与原产地的“气候相似性”问题是综合复杂的,如两地的温热指标相同而其降水量差别较大,或两地的降水量基本一致但分布规律不同^[7],无法依据任何单一标准去评判。因此,环境条件的多变性和信息的模糊性,使得对目标引种地气候适宜性的评估缺乏综合直观的评判方法和数量标准。灰色系统理论已在工业、农业、环境和生态等众多科学领域成功地解决了许多实际问题,得到广泛的应用^[8-10];因此将其应用在物种适宜引种地的评估可获得较佳的效果^[11]。

浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)隶属于樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe* Nees),不仅材质优良,可作为珍贵高档家具和建筑材料;还因其树形优美端庄,可广泛用于南方的园林绿化,亦可作为丘陵山区的宜林树种^[12]。但由于分布范围狭窄、种群天然更新不良、人为干扰和生境破碎化等各种因素的影响,浙江楠这一珍贵的资源近于枯竭,处于濒危状态,现已被列入国家Ⅱ级重点保护植物^[13],目前仅局限分布于华东地区的浙江、安徽、江西和福建等少数地区。当前,对浙江楠的研究主要集中在资源分布与利

用、种群生态学、群落生物多样性、种子生理、造林育种以及致危原因等方面^[14],对其资源的保护与利用方面发挥了积极作用。然而,系统深入地对浙江楠引种目的地的气候适宜性的研究仍未见报道。为践行习近平总书记“绿水青山就是金山银山”的重要理念,江苏省政府以发展材质优良、效益显著、前景广阔的珍贵乡土树种资源为重点,深挖造林潜力,大力推动全社会参与国土绿化,出台了《江苏省珍贵用材树种培育行动方案(2016—2020)》(以下简称《方案》);同时,《方案》也明确提出了34种珍贵造林树种在江苏地区的推广栽培,浙江楠名列其中。

本研究基于灰色理论系统,将浙江楠目标引种地(江苏13个地市)作为一个灰色系统,以其原产地(浙江杭州)作为参考理想地;并根据目标引种地与原产地的19个生物气候指标的灰色关联度,结合主成分分析,提出浙江楠在江苏各地引种的气候适宜综合评价模型,一方面可为浙江楠在江苏地区的引种栽培和开发利用提供科学依据,使浙江楠在江苏地区的推广栽培更贴合《方案》要求,符合“适地适树”原则;另一方面亦可丰富绿色江苏建设的树种素材。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

江苏省位于中国东部沿海地区,是长三角洲的重要组成部分,其地理位置为E116°18′~121°57′,N30°45′~35°20′,陆地面积约10.72万km²。地形以平原为主,同时在西南部地区有少量的丘陵山地,最高峰为北部连云港市的玉女峰(海拔625m)。江苏省水系发达,长江、淮河、京杭大运河、太湖、石臼湖及各类大小湖泊纵横交错。气候区为亚热带向温带过渡区域,表现为四季分明、雨量适中和气候温和等。从北至南,气温和降水逐渐递增:年均温13~16℃,最热月均温为26~28℃,最冷月均温为-1.0~3.3℃;年降水量700~1200mm。这种气候递变现象,相应地也体现在植物的分布规律上^[15]。

1.2 数据获取

将浙江楠天然分布点及目标引种地(江苏 13 个地市)地理坐标输入 DIVA-GIS 7.5 软件中,并从软件中提取 19 个生物气候数据。生物气候数据来自 Worldclim (<http://www.worldclim.org>),其原理是通过世界各地气象站的气象观测记录,采用空间插值法生成的空间分辨率为 2.5' (约 5 km²) 的全球气候数据包^[16]。生物气候数据包括 19 项^[17],如表 1 所示。

1.3 灰色关联分析

灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断因素间的联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的关联程度就越大,反之就越小;灰色关联度越大,表明与样本点条件越相似^[18]。

(1) 数列的构建^[19]。以浙江楠在杭州的平均生物气候数据构建已知参考数列: $x_0 = \{x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots, x_0^{(k)}\}$ 。浙江楠目标引种地生物气候指标的被比数列为: $x_i = \{x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(k)}\}$ 。上述数列中 $i, k=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 数据标准化^[20]。由于各生物气候指标的计量单位不同,指标间数量差异较大,不同量纲之间无法比较,因此,在进行灰色关联分析时须对各定量评价价值进行无量纲化处理^[21],即: $Z_i^k = (X_i^k - \bar{X}^k) / S^k$ 。式中, Z_i^k 、 X_i^k 、 $\bar{X}^k$ 和 S^k 分别代表参考数列和被比数列的原始数据变换后的标准数据、样本生物气候数据、样本平均值和标准方差;具体计算过程由 PAST 3.0 软件完成。

(3) 参考数列 (x_0) 与被比数列 (x_i) 的关联系数^[22]: $r_{0i}(k) = \frac{\min_k \min_i \Delta_i(k) + \rho \max_k \max_i \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_k \max_i \Delta_i(k)}$ 。式中, $\Delta_i(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)|$, $\min_k \min_i \Delta_i(k)$ 和 $\max_k \max_i \Delta_i(k)$ 分别为 $\Delta_i(k)$ 的极小值和极大值; ρ 为分辨系数,是为了消弱最大绝对差因过大而失真的影响,以提高关联系数之间的差异显著性而人为给定的系数,其值范围为 0.1~1.0^[23],本研究参考多数学者的做法取 0.5^[19, 21, 24]。

(4) 等权关联度。该指标是对各性状关联系数的平均值,可反映目标引种地之间的差异大小;关联度大,表明目标引种地与“理想产地”生物气候环境的相似程度高,反之则差异大^[25-26]。为避免信息过于分散及便于比较,将目标引种地的生物气候指标与原产地相应指标的关

联系数取算术平均值,定义为等权关联度 (δ),公式为: $\delta = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r_{0i}(k)$ 。

1.4 综合评价模型

各生物气候对物种分布的影响贡献率不同,故应对较为重要的生物气候因子进行加权。一般加权方法是通过专家打分,但主观因素较强。因此,本研究采用主成分分析法,利用特征向量的载荷和各主成分的贡献率进行综合评价模型的构建^[27]。

(1) 主成分分析。本研究以浙江楠在浙江省杭州市内的 22 个分布点的 19 项生物气候因子,构建 19×22 的矩阵进行主成分分析,获得影响浙江楠天然分布的主导生物气候因子。

(2) 综合评价模型。利用主成分的特征向量 (X),构建主成分与关联系数之间的线性方程。特征向量 (X) 的载荷越大,说明其重要性越高。本研究取累计贡献率达 90% 之前的 n 个主成分轴内的 4 个最大特征向量值构建方程;再结合主成分各轴的方差贡献率构建浙江楠在目标引种地的综合评价模型。

2 结果与分析

2.1 等权关联度

通过表 1 原始数据的无量纲化处理、标准数据的绝对差值计算、关联系数和等权关联度等步骤,最终获得浙江楠在江苏各目标引种城市的关联系数和等权关联度。由表 2 可知:目标引种地各城市与“理想产地”之间的等权关联系数平均值为 0.696,其范围值 0.523~0.834。综合参考不同学者的研究观点^[23, 28-29],本研究根据等权关联度的结果,以平均值为界线,大致可将 13 个目标引种地城市划分为 3 类:Ⅰ类为高适宜区,包括常州 (0.834)、无锡 (0.797) 和苏州 (0.777),为典型的江苏南部地区;Ⅱ类为中度适宜区,包括泰州 (0.763)、南通 (0.759)、扬州 (0.711)、镇江 (0.702) 和南京 (0.697),可概括为江苏中部地区;Ⅲ类为低适宜区,包括盐城 (0.691)、淮安 (0.648)、宿迁 (0.579)、连云港 (0.563) 和徐州 (0.523),为江苏北部地区。Ⅰ类地区和Ⅱ类地区为淮河以南的城市,其地理位置在中国亚热带北线的以南地区,这一划分结果与杭州气候特征为亚热带的属性吻合。

表 1 江苏各地市与浙江楠自然生长地主要生物气候值
Tab. 1 Bioclimate values for target cities of Jiangsu Province and natural distribution of *P. chekiangensis*

生物气候 bioclimate	编号 No.	原产地及目标引种地 natural and target introduced regions													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
年均温/℃ annual mean temperature	Bio1	15.40	15.55	15.56	15.46	15.20	15.51	15.47	15.38	15.00	14.49	14.58	14.68	14.70	13.40
昼夜温差均值/℃ mean diurnal range	Bio2	7.92	7.53	7.64	7.78	6.82	8.75	7.76	8.00	8.19	8.55	8.64	9.28	9.80	8.63
昼夜温差与年温差比值 isothermality	Bio3	24.72	24.62	24.65	24.32	22.20	26.12	23.30	23.95	24.75	25.75	25.80	26.75	27.30	25.02
温度变化方差 temperature seasonality	Bio4	870.65	875.75	883.92	918.11	890.04	935.57	970.21	967.68	944.75	937.45	957.11	987.57	1010.97	988.31
极端高温/℃ max temperature of warmest month	Bio5	31.53	31.10	31.30	31.60	30.60	31.80	32.20	32.10	31.50	30.70	30.60	31.10	31.80	29.80
极端低温/℃ min temperature of coldest month	Bio6	-0.50	0.50	0.30	-0.40	-0.10	-1.70	-1.10	-1.30	-1.60	-2.50	-2.90	-3.60	-4.10	-4.70
年温度变化较差 temperature annual range	Bio7	32.03	30.60	31.00	32.00	30.70	33.50	33.30	33.40	33.10	33.20	33.50	34.70	35.90	34.50
最湿季均温/℃ mean temperature of wettest quarter	Bio8	22.44	26.13	26.25	26.55	25.88	26.78	27.15	27.05	26.37	25.82	26.15	26.57	26.85	24.68
最干季均温/℃ mean temperature of driest quarter	Bio9	9.00	11.93	11.83	6.48	6.50	5.95	3.62	3.52	3.30	2.80	2.50	9.63	1.75	0.83
最热季均温/℃ mean temperature of warmest quarter	Bio10	25.89	26.13	26.25	26.55	25.88	26.78	27.15	27.05	26.37	25.82	26.15	26.57	26.85	25.28
最冷季均温/℃ mean temperature of coldest quarter	Bio11	4.41	4.80	4.70	4.10	3.97	3.70	3.62	3.52	3.30	2.80	2.50	2.07	1.75	0.83
年均降水/mm annual precipitation	Bio12	1499	957	1004	1063	1068	1004	1029	1012	1001	976	903	751	759	851
最湿月降水/mm precipitation of wettest month	Bio13	243	152	154	180	183	180	188	206	212	216	239	199	220	208
最干月降水/mm precipitation of driest month	Bio14	46	32	33	36	34	32	31	30	36	30	23	21	14	16
降水变化方差 precipitation seasonality	Bio15	49.43	51.53	53.22	54.47	57.00	55.02	59.05	63.82	66.70	76.16	86.89	98.35	97.44	91.36
最湿季均降水/mm mean precipitation of wettest quarter	Bio16	596	412	439	464	474	443	474	481	493	516	503	467	452	493
最干季均降水/mm mean precipitation of driest quarter	Bio17	168	115	113	126	118	115	114	105	113	92	78	64	50	52
最热季均降水/mm mean precipitation of warmest quarter	Bio18	540	412	439	464	474	443	474	481	493	516	503	467	452	476
最冷季均降水/mm mean precipitation of coldest quarter	Bio19	203	144	150	135	122	116	114	105	113	92	78	67	50	52

注: A-N分别表示杭州、苏州、无锡、常州、南通、南京、镇江、扬州、泰州、盐城、淮安、宿迁、徐州和连云港;下同。
Note: A-N stand for Hangzhou, Suzhou, Wuxi, Changzhou, Nantong, Nanjing, Zhenjiang, Yangzhou, Taizhou, Yancheng, Huai'an, Suqian, Xuzhou and Lianyungang, respectively; the same as below.

2.2 主成分分析

由表 3 可知：前 4 个主成分的贡献率分别为 40.15%、27.07%、18.67 和 6.41%，前 4 个累计贡献率已超 90%；因此前 4 个主成分足以代表浙江楠原产地的主要生物气候信息。第 1 主成分的贡献率最大，其中 Bio1 (年均温) 和 Bio11 (最冷季均温) 的负载值均为 0.33，Bio3 (昼夜温差与年温差比值) 和 Bio15 (降水变化方差) 的负载值为 0.32，这 4 个值在第 1 主成分中占有最重要的位置；由此可知：温度是影响第 1 主成分的主要因素。在第 2 主成分中，Bio19 (最冷季均降水)、Bio17 (最干季降水)、Bio14 (最干月降水) 和 Bio12 (年均降水) 的载荷分别为 0.38、0.37、0.33 和 0.32，可知水分在该轴中的影响较大。尤其是冬季和夏季降水的影响，说明浙江楠在原产地生长对水分有一定的要求。第 3 主成分中较为重要的生物气候指标是 Bio4 (温度变化方差)、Bio5 (极端高温)、Bio7 (年温度变化较差) 和 Bio10 (最热季均温)，可看出高温对浙江楠也有一定的影响。

2.3 综合评价模型构建

根据表 3 前 4 个主成分，取各主成分中的前

4 个特征向量值，构建主成分与等权关联系数之间的线性模型，即： $Y_1=0.33k_1+0.32k_3+0.33k_{11}+0.32k_{15}$ ， $Y_2=0.32k_{12}+0.33k_{14}+0.37k_{17}+0.38k_{19}$ ， $Y_3=0.36k_4+0.43k_5+0.41k_7+0.39k_{10}$ ， $Y_4=0.58k_8+0.24k_9+0.38k_{14}+0.28k_{17}$ 。由于每 1 个主成分的贡献率不均等，因此各目标引种城市的气候适宜综合评价模型应考虑各主成分的贡献率，故综合评价模型方程为 $\lambda=0.4015Y_1+0.2707Y_2+0.1867Y_3+0.0641Y_4$ 。利用该线性模型对拟引种的 13 个城市进行综合评价，其结果与排序见表 4。由表 4 可知：Ⅰ类高适宜区 ($\lambda \geq 1.100$) 包括常州 (1.182)、无锡 (1.170) 和苏州 (1.156) 这 3 个江苏南部城市；Ⅱ类中适宜区 ($0.900 \leq \lambda < 1.100$) 包括南通 (1.055)、泰州 (1.050)、南京 (1.009)、镇江 (0.961) 和扬州 (0.957)；Ⅲ类低适宜区 ($\lambda < 0.900$) 则仍是江苏北部的城市，包括盐城 (0.875)、淮安 (0.790)、宿迁 (0.721)、连云港 (0.696) 和徐州 (0.669)。因此，综合评价排序的结果与等权关联度的结果在整体表现上基本一致。

结合等权关联度和综合评价模型的结果均表明：江苏南部地区是浙江楠在江苏引种较为适宜

表 2 江苏目标城市生物气候指标关联系数和等权关联度

Tab. 2 Grey correlation and equal-weight correlation degree of each bioclimate in different cities of Jiangsu Province

关联系数 grey correlation	目标城市 target cities												
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
k_1	0.89	0.88	0.96	0.85	0.92	0.95	1.00	0.73	0.53	0.56	0.59	0.60	0.34
k_2	0.77	0.84	0.94	0.50	0.58	0.93	1.00	0.84	0.65	0.61	0.44	0.36	0.62
k_3	0.95	0.97	0.78	0.35	0.49	0.49	0.64	1.00	0.57	0.56	0.40	0.34	0.83
k_4	1.00	0.90	0.64	0.84	0.56	0.44	0.45	0.52	0.55	0.48	0.40	0.36	0.40
k_5	0.69	0.82	0.96	0.50	0.79	0.58	0.62	1.00	0.53	0.50	0.69	0.79	0.34
k_6	0.71	0.76	1.00	0.88	0.67	0.81	0.76	0.69	0.54	0.49	0.42	0.39	0.35
k_7	0.58	0.66	1.00	0.60	0.58	0.61	0.59	0.65	0.63	0.58	0.43	0.34	0.45
k_8	0.76	0.75	0.71	0.79	0.69	0.65	0.66	0.73	0.80	0.76	0.71	0.68	1.00
k_9	0.67	0.68	0.71	0.72	0.66	0.50	0.49	0.48	0.46	0.45	1.00	0.42	0.38
k_{10}	0.74	0.65	0.50	1.00	0.42	0.34	0.36	0.58	0.91	0.72	0.49	0.40	0.52
k_{11}	0.95	1.00	0.99	0.93	0.83	0.81	0.78	0.72	0.61	0.56	0.50	0.47	0.39
k_{12}	0.88	0.93	0.99	1.00	0.93	0.95	0.93	0.92	0.90	0.83	0.72	0.72	0.79
k_{13}	0.36	0.37	0.46	0.47	0.46	0.49	0.60	0.65	0.68	1.00	0.55	0.72	0.62
k_{14}	0.86	0.89	1.00	0.93	0.86	0.83	0.81	1.00	0.81	0.66	0.63	0.53	0.56
k_{15}	1.00	0.94	0.90	0.83	0.88	0.78	0.68	0.64	0.52	0.43	0.36	0.37	0.40
k_{16}	0.62	0.69	0.77	0.80	0.70	0.80	0.83	0.88	1.00	0.93	0.78	0.73	0.88
k_{17}	0.90	0.89	1.00	0.93	0.90	0.89	0.83	0.89	0.75	0.68	0.62	0.57	0.58
k_{18}	0.46	0.53	0.63	0.68	0.55	0.68	0.72	0.79	1.00	0.87	0.64	0.58	0.69
k_{19}	0.96	1.00	0.90	0.82	0.79	0.78	0.74	0.78	0.69	0.64	0.61	0.56	0.57
δ	0.777	0.797	0.834	0.759	0.697	0.702	0.711	0.763	0.691	0.648	0.579	0.523	0.563
排序 rank	3	2	1	5	8	7	6	4	9	10	11	13	12

注： δ 为等权关联度。

Note: δ is equal-weight relevancy.

表 3 浙江楠天然分布区生物气候指标主成分分析
Tab. 3 Principal component analysis on bioclimate of natural distribution area for *P. chekiangensis*

生物气候 bioclimate	主成分 principal component analysis (PCA)			
	PC1 (Y_1)	PC2 (Y_2)	PC3 (Y_3)	PC4 (Y_4)
Bio1	0.33	-0.13	0.15	0.09
Bio2	0.23	0.17	0.19	-0.38
Bio3	0.32	0.01	-0.13	-0.26
Bio4	-0.24	0.13	0.36	0.02
Bio5	0.21	-0.04	0.43	0.01
Bio6	0.31	-0.21	-0.06	0.16
Bio7	-0.15	0.18	0.41	-0.15
Bio8	-0.02	-0.27	0.06	0.58
Bio9	0.29	-0.13	0.07	0.24
Bio10	0.21	-0.08	0.39	0.14
Bio11	0.33	-0.16	-0.04	0.09
Bio12	0.16	0.32	-0.24	0.17
Bio13	0.23	0.31	-0.12	-0.05
Bio14	-0.06	0.33	0.17	0.38
Bio15	0.32	0.13	0.04	-0.06
Bio16	0.26	0.30	-0.04	0.02
Bio17	-0.11	0.37	0.10	0.28
Bio18	-0.02	0.22	-0.39	0.21
Bio19	0.14	0.38	0.10	0.10
特征根 eigenvalue	7.63	5.14	3.55	1.22
方差贡献率/% variance contribution rate	40.15	27.07	18.67	6.41
累计贡献率/% cumulative contribution rate	40.15	67.22	85.89	92.29

的地区。浙江楠在江苏引种的适宜程度如图 1 所示。

3 讨论

气候对物种的影响是一个综合与长期的过程, 尤其是温度和水分的影响, 它们既可以影响植物光合、呼吸和蒸腾等代谢过程, 也可以影响有机物的合成和运输等过程, 最终影响植物的生长与分布^[30]。主成分分析的结果表明: 影响浙江楠在原产地天然分布的最关键性因子是温度。同时, 等权关联和综合评价模型的结果均支持在江苏南部地区引种浙江楠的适宜性高于江苏中部和北部地区。在气候大格局下, 温度是限制浙江楠向北分布的重要因素。因此, 需关注最冷月均温及极端低温等因素对目标引种地的影响。研究表明: 浙江楠苗木在南京地区冬季多数会受到一定

程度的轻微冻害^[31], 这主要是因为浙江楠进入苗木硬化期时间较晚, 导致部分来不及完全木质化的苗木遭受寒潮的袭击。为了避免苗木发生冻害, 在初秋时节应避免肥料的施用, 同时通过控制土壤水分促使浙江楠苗木木质化^[32]。因此, 在气候指标的指导下, 应加强浙江楠苗木在引种地的生理生态与适应性研究。

从浙江楠原产地杭州的气候指标来看, 年均温和年降水量分别约为 16 ℃ 和 1 500 mm, 具有热量充沛和雨水丰富的亚热带气候特征。与其临近的江苏南部城市苏州、无锡和常州虽然年降水量有所减少, 但年均温等其他气候因子均较为接近, 因此在等权关联和综合评价模型的结果均支持上述 3 个城市与“理想产地”具有较为相似的气候特征。百年浙江楠古树在苏州的发现也证实了江苏南部对浙江楠的引种具有较强的适宜性^[12]。往北的南京、镇江、扬州、泰州和南通等 5 个城市均在淮河以南地区, 恰好是中国亚热带的北线, 气候特征大体上表现为最冷月的月均温度在 0~2 ℃, 带内大多数地区的年降水量为 750~1 300 mm^[33]。该区域已是亚热带的北缘, 受温度影响浙江楠已有冻害的情况出现, 故该区域为中等适宜引种区。再往江苏北部, 盐城、淮安、徐州、连云港和宿迁等 5 个城市在气候带上已属中国暖温带的南部地区, 其年均温和年降水量等水热条件均不如前 2 个区域, 且极端低温和最冷月均温等也较为严酷, 因此该区域可划分为浙江楠引种的低适宜区。

不同学者对物种的引种适生区评估提出了许多模型, 如层次分析法^[34]、隶属函数法^[35]和长期引种试验^[36]等。虽然也可以获得较好的研究结果, 但均存在主观评判、数据量大、样本需服从某个典型的概率分布、时间长和工作量大等问题。本研究在灰色系统理论的基础上, 通过对数据进行无量纲化处理, 建立“理想产地”, 然后通过比较得到关联度值, 并结合主成分分析构建了综合评价模型, 最终获得目标引种地的适宜性结果。这种方法采用了客观的生物气候指标, 避免了人为评判的主观性, 其分析结果与实际现状相吻合, 说明灰色系统理论与主成分分析方法相结合的评价模型适用于引种目的地适宜性评价。

表 4 目标引种地综合评价模型

Tab. 4 Comprehensive evaluation model of target introduced cities

目标地 target cities	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	λ	排序 rank
常州 Changzhou	0.472	0.366	0.269	0.074	1.182	1
无锡 Wuxi	0.492	0.350	0.257	0.071	1.170	2
苏州 Suzhou	0.492	0.340	0.252	0.071	1.156	3
南通 Nantong	0.385	0.346	0.249	0.074	1.055	4
泰州 Taizhou	0.400	0.337	0.243	0.070	1.050	5
南京 Nanjing	0.407	0.328	0.206	0.068	1.009	6
镇江 Zhenjiang	0.394	0.326	0.178	0.064	0.961	7
扬州 Yangzhou	0.403	0.311	0.180	0.062	0.957	8
盐城 Yancheng	0.290	0.295	0.224	0.065	0.875	9
淮安 Huai'an	0.274	0.264	0.193	0.059	0.790	10
宿迁 Suqian	0.241	0.242	0.173	0.064	0.721	11
连云港 Lianyungang	0.253	0.234	0.147	0.063	0.696	12
徐州 Xuzhou	0.231	0.225	0.162	0.051	0.669	13

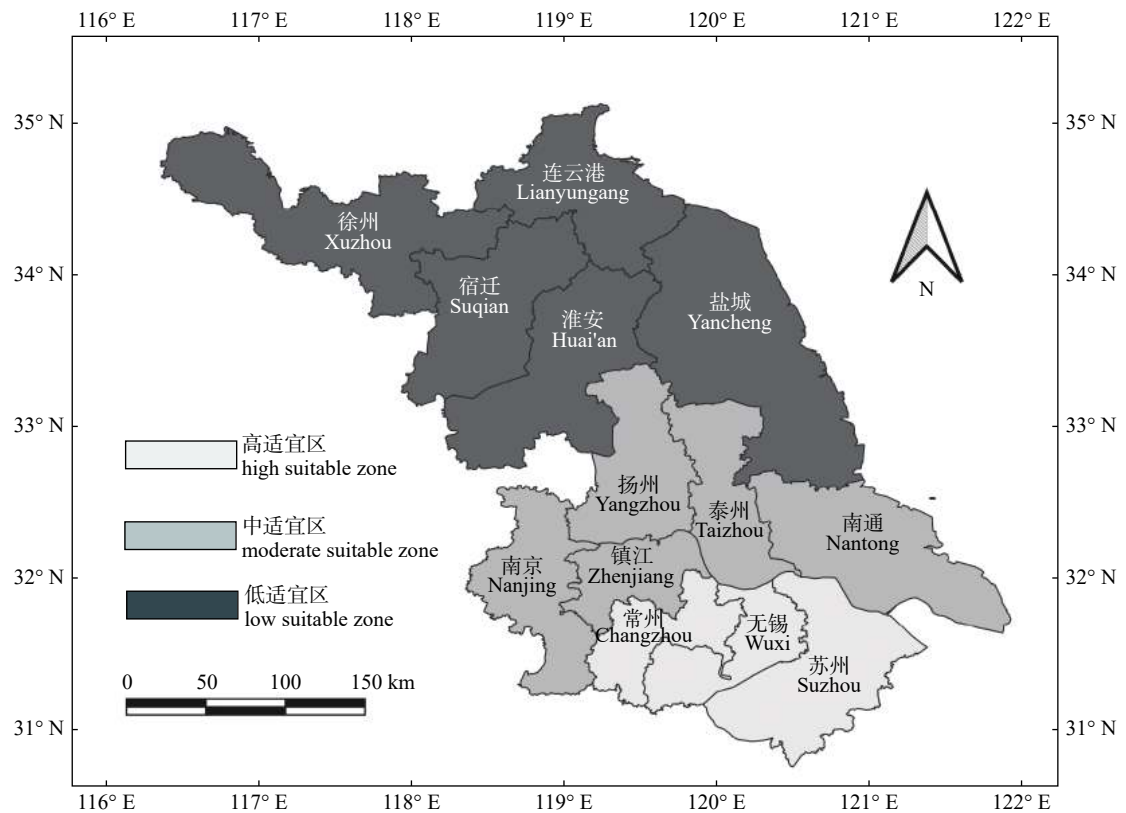


图 1 浙江楠在江苏目标引种地的适宜度

Fig. 1 Suitability area for *P. chekiangensis* in target introduced cities of Jiangsu Province

4 结论

利用灰色关联度和主成分关键特征向量值构建的引种适宜性综合评价模型可将浙江楠在江苏各地市的适宜性划分为三类。I类为高适宜引种

区，包括常州、无锡和苏州；II类为中适宜引种区，包括南京、镇江、扬州、泰州和南通；III类为低适宜引种区，包括盐城、淮安、徐州、连云港和宿迁。浙江楠在江苏适宜区的划分结果可为该物种在本区域的推广种植提供有价值的科学参考。

[参考文献]

- [1] 谭雪, 张林, 张爱平, 等. 孑遗植物长苞铁杉 (*Tsuga longibracteata*) 分布格局对未来气候变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8934. DOI: 10.5846/stxb201806021236.
- [2] 朱莹莹, 徐晓婷. 气候变化对我国特有濒危物种水杉野生种群分布的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1629. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201906.018.
- [3] 王凤英, 田旗, 彭红玲, 等. 舟山群岛2种濒危植物生境特征与迁地保护研究[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(3): 417. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2014.03.014.
- [4] 刘梦婷, 魏新增, 江明喜. 濒危植物黄梅秤锤树野生与迁地保护种群的果实性状比较[J]. 植物科学学报, 2018, 36(3): 354. DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.30354.
- [5] 张琴, 宋经元, 邵飞, 等. 防风固沙优良树种欧李的潜在适生区及生态特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(3): 66. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170180.
- [6] 郑道君, 云勇, 吴宇佳, 等. 海南龙血树野生资源分布及其与水热关系的分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(4): 326. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.04.002.
- [7] 牛侯艳, 樊保国, 梁立峰, 等. 灰色系统理论在果树产地气象生态适宜性评估中的应用初探[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 281.
- [8] 杨秀娟, 陶琳丽, 邓斌, 等. 菲牛蛭与蛋白饲料原料氨基酸平衡的灰色关联度分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(1): 43. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711065.
- [9] 雷兴刚, 邓君明, 麦康森. 灰色关联度分析法评价蛋白质营养价值的可行性探讨[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2010, 25(4): 545. DOI: 10.3969/j.issn.1004-390X.2010.04.018.
- [10] 褚盼盼, 王晓晶, 呼凤兰. 灰色系统理论及其在南瓜产量相关性状方面的研究进展[J]. 蔬菜, 2013(7): 22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8336.2013.07.009.
- [11] 赵琳, 邓继峰, 周永斌, 等. 基于灰色理论分析辽西北半干旱地区适地适树造林决策[J]. 林业资源管理, 2016(5): 77. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2016.05.014.
- [12] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 珍稀树种浙江楠的栽培利用研究[J]. 江苏林业科技, 2004, 31(1): 23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2004.01.007.
- [13] 吴显坤, 朱筠. 珍稀树种浙江楠植物物种鉴定[J]. 森林公安, 2015(6): 24. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8038.2015.06.011.
- [14] 王松, 方芳, 范正文, 等. 浙江楠研究现状及濒危保护建议[J]. 华东森林经理, 2019, 33(3): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7743.2019.03.004.
- [15] 江苏省植物研究所. 江苏植物志(上)[M]. 南京: 江苏人民出版社, 1977.
- [16] 邱靖, 朱弘, 陈昕, 等. 基于DIVA-GIS的水榆花楸适生区模拟及生态特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 25. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180162.
- [17] 刘然, 王春晶, 何健, 等. 气候变化背景下中国冷杉属植物地理分布模拟分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 37. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2018.01.005.
- [18] 范立张, 朱勇, 王树会. 灰色关联度在云南烤烟种植适宜性分析中的应用[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 474. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2006.04.023.
- [19] 余龙江, 孙友平, 程华, 等. 玛咖引种气候适宜区域的选择[J]. 生命科学研究, 2004, 8(3): 250. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7847.2004.03.010.
- [20] 冯海萍, 王春良, 谢华, 等. 应用灰色关联法探讨玛咖在宁夏地区适宜的引种区域[J]. 宁夏农林科技, 2015, 56(10): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-204X.2015.10.026.
- [21] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地引种植物适应性评价指标体系的构建与应用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 849. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2009.05.012.
- [22] 张璠, 肖斌. 茶叶产量与气象因子的灰色关联度分析——以陕南茶区为例[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5): 735. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2018.05.016.
- [23] 吴志华, 李天会, 张华林, 等. 广东湛江地区绿化树种抗风性评价与分级选择[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(1): 18. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7791.2011.01.005.
- [24] 赵菊, 苏泽春, 杨丽云, 等. 灰色理论在金铁锁引种适宜区选择中的应用[J]. 江西农业学报, 2016, 28(4): 15. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8581.2016.04.004.
- [25] 田兵, 冉雪琴, 薛红, 等. 贵州42种野生牧草营养价值灰色关联度分析[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 92. DOI: 10.11686/cyxb20140112.
- [26] 李玉平, 周生辉, 马玉莲, 等. 应用灰色关联度理论对宁夏引黄灌区引种的苜蓿进行综合评析[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2006, 19(5): 5.
- [27] 谢春平. 基于主成分分析对宁镇山脉乡土树种综合评价[J]. 种子, 2019, 38(4): 148. DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.04.148.
- [28] 樊保国, 李月梅, 李登科. 冬枣引种栽培区气候适宜性的灰色综合评估[J]. 中国农学通报, 2011, 27(8): 208.
- [29] 孙浩元, 续九如, 王玉柱, 等. 应用灰色聚类法和灰色关联分析对台湾青枣引种适宜区的选择[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 143. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6850.2006.04.037.
- [30] 谢春平. 南方红豆杉分布区生态适应性分析[J]. 热带地理, 2014, 34(3): 359. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002517.
- [31] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 南京地区浙江楠苗期冻害调查研究[J]. 江苏林业科技, 2005, 32(4): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2005.04.003.
- [32] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 浙江楠苗期生长节律[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(3): 117. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2004.03.023.
- [33] 江爱良. 论我国热带亚热带气候带的划分[J]. 地理学报, 1960, 26(2): 104. DOI: 10.11821/xb196002003.
- [34] 李周园, 刘艳红, 戴腾飞, 等. 应用层次分析法建立北京市引种乔木评价体系[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(S1): 100. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2010.s1.030.
- [35] 董雪, 赵英铭, 黄雅茹, 等. 乌兰布和沙漠引种抗虫杨树品种中龄期生长适应性评价[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(7): 123. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2017.0382.
- [36] 连勇机. 秃杉引种效果分析[J]. 福建林业科技, 2013, 40(3): 93. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7351.2013.03.21.

责任编辑: 何馨成