

DOI: 10.5846/stxb201409231880

康传志, 周涛, 郭兰萍, 黄璐琦, 朱寿东, 肖承鸿. 全国栽培太子参生态适宜性区划分析. 生态学报, 2016, 36(10): - .

Kang C Z, Zhou T, Guo L P, Huang L Q, Zhu S D, Xiao C H. Ecological suitability and regionalization of *Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax et Hoffm. in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

全国栽培太子参生态适宜性区划分析

康传志¹, 周涛^{1,*}, 郭兰萍², 黄璐琦², 朱寿东², 肖承鸿¹

¹ 贵阳中医学院, 贵阳 550002

² 中国中医科学院中药资源中心, 道地药材国家重点实验室, 北京 100700

摘要: 采用 ArcGIS 地理信息系统软件的空间分析方法和 SPSS 统计软件的统计分析方法, 分析了全国太子参潜在适宜种植地理分布、适宜生境及化学成分与环境因子的相关性。结果显示: 采用聚类分析从 46 个样地中筛选出 34 个多糖含量较高的样地。所建模型经 ROC 曲线验证, 预测效果非常好 (AUC > 0.9)。最干月降水量 (贡献率 68.4%)、土壤类型 (9.7%)、最暖季平均温 (6.0%)、等温性 (4.0%) 是影响太子参种植分布最重要的环境因子, 其最适宜生境范围为: 最干月降水量 20—60mm; 最暖季平均温 21.5—30.5℃; 等温性 18%—35%; 土壤类型为不饱和薄层土、饱和粘磬土中的黄棕壤、黄壤、黄红壤。相关性分析显示, 多糖和生境适宜度均与最湿季降水量、最暖季降水量、最暖季平均温、最干月降水量及年平均气温无显著相关性。太子参最适宜区主要分布在长江中下游区域, 主要有贵州中部, 重庆与湖南、湖北接壤处, 河南南部, 安徽西部, 江苏中部, 福建东北部以及浙江北部和东南部区域。因此, 明确全国太子参潜在的适宜种植区可为太子参种植基地的选取和合理布局提供参考。

关键词: 太子参; Maxent 模型; 多糖; 环境因子; 生态区划

Ecological suitability and regionalization of *Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax et Hoffm. in China

KANG Chuazhi¹, ZHOU Tao^{1,*}, GUO Lanping², HUANG Luqi², ZHU Shoudong², XIAO Chenghong¹

¹ Guiyang College of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550002, China

² State Key Laboratory of Dao-di herbs, National Resources Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

Abstract: In this study of the medicinal plant, *Pseudostellaria heterophylla*, we obtained the national ecological factors, such as terrain factors, soil factors, and climatic factors, from Chinese Medicine resources geospatial grid information database. An additional 46 samples and their distribution information were obtained through field investigation. We used cluster analysis to filter high polysaccharide contents in samples by using the ArcGIS and Maxent model for ecologically suitable planting and growth of *P. heterophylla*. Correlation analysis of polysaccharides and five climatic factors (wet season, warmest rain, warmest average temperature, driest month, and annual average temperature) were analyzed by SPSS. The following results are presented in this study. We screened sample plots down from 46 to 34 based on polysaccharide content. The models produced accurate forecasts, which were tested by the ROC curve (AUC > 0.9). Driest month precipitation (contribution rate, 68.4%), soil types (9.7%), warm-season average temperature (6.0%), and isothermality (4.0%) were the most important ecological factors influencing the distribution of polysaccharides in cultivated *P. heterophylla*. When comparing the three factors noted above (terrain, soil, and climatic), soil factors and climatic factors are more influential

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81460579); 中央本级重大增减支项目“名贵中药资源可持续利用能力建设” (2060302); 贵州省研究生工作站建设项目 (黔教研合 JYSZ 字 [2014] 016); 施秉中药材产业科技合作专项计划项目 (施中药科合专项 (2014) 第 6 号)

收稿日期: 2014-09-23; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taozhou88@163.com

on the growth of cultivated *P. heterophylla* with respect to the distribution of polysaccharides. The environmental variables in the areas with the highest potential for cultivation were as follows: the driest month (between 20 and 60 mm of precipitation), the warmest average temperature (between 21.5 and 30.5°C), isothermality (between 18 and 35%), and soil types, such as Dystric Leptosols, Eutric Planosols, Chromic Luvisols, and Ferric Alisols. Correlation analysis revealed that polysaccharides and habitat suitability do not have a significant correlation with the wet season rainfall, warmest season precipitation, warm-season average temperature and precipitation, driest months, and annual mean temperature. It can be inferred that the production of polysaccharides is not dominated by the climatic factors. Regionalization analysis results showed that the most suitable areas for *P. heterophylla* planting are mainly distributed in the provinces of the middle and lower reaches of the Yangtze River area. Specifically, these areas include central Guizhou, which is bordered by Chongqing, Hunan, Hubei, southern Henan, western Anhui, central Jiangsu, northwestern Fujian, and northern and southeastern Zhejiang. These areas are within the Dao-di area, and are the main agricultural production areas. We used spatial analysis technology to select a suitable ecological area for *P. heterophylla* planting and provide information about a reasonable layout for its cultivation using climate, soil, and terrain characteristics. Finally, because the effects of polysaccharides and the positive supplementary effects of *P. heterophylla* roots are similar, we analyzed the content of polysaccharides as an indicator of high quality *P. heterophylla* using samples from five main producing areas in the country. We analyzed a wide range of material from a large sample size, and showed that reliable results can be obtained from samples within the Dao-di area. We also used new analysis methods to analysis our results. In this paper, the data covering ecological factors and degree of differentiation were highly accurate and offered more clarity than previous studies. Moreover, this study expands on research methods pertaining to the ecological suitability of regions for *P. heterophylla* cultivation and provides some new ideas and approaches on regional ecological zones and standardized cultivation of medicinal plants. Further, we have detailed useful information that will aid other medicinal plant research, especially endangered medicinal plant species.

Key Words: *Pseudostellaria heterophylla*(Miq.)Pax ex Pax et Hoffm.; Maxent model; polysaccharide; ecological factor; ecological regionalization

中药太子参 *Pseudostellariae Radix* 具有益气健脾、生津润肺的功效。野生资源主要分布在东北、华北、华中、华东地区,如辽宁、内蒙古、河北、山东、安徽、江苏、河南、江西等省区^[1]。随着野生资源的稀缺,现今太子参在中医临床配方、中成药、保健药品生产中所用药材均来自栽培资源。目前全国比较大的太子参栽培产区有山东、安徽、江苏、福建、贵州,其中以安徽宣城、福建柘荣、贵州施秉所产药材占据太子参药材商品市场的主流。

太子参因药性温和,可药食两用,向保健食品、化妆品发展的趋势也在加强。以贵州为例,随着近五年来太子参药材商品价格的不断攀升,十余个县市行政区拟以发展太子参药材种植作为推动地方经济发展的手段之一。而作者前期在分析太子参资源现状、生物学特性,探讨药材品质变化的因素中,发现太子参在生产种植上缺乏合理布局,受人为主观因素影响较大,再加上太子参存在连作障碍,每年都面临重新选地和产区扩大等问题,而已有的研究报道显示,各地栽培太子参药材中的有些次生代谢产物含量差异显著^[2],因此,依据药材治疗功效,在明确品质特征基础上,选择合理的生产种植区域,方能有效保证太子参栽培药材的产量和质量。

生态适宜性区划是基于中药资源和生态环境因子,对中药资源的空间分异规律进行的区域划分,可为中药材科学选址和适宜性种植提供参考。现代药理研究已证明,太子参多糖具有抗应激、抗疲劳、增强免疫力的功效^[3],这与太子参药材益气健脾、补气生津的功效是相一致的,而有学者研究发现不同栽培产区太子参药材中的多糖含量差异并不明显^[4],同时,还发现太子参药材外观越饱满的块根中多糖含量越高^[5],符合市场对太子参药材商品等级划分的要求,可作为太子参药材内外品质的评价指标。鉴于目前太子参在生产布局方面存在的

问题及生态适宜性区划研究方法的日渐成熟,本文以太子参药材目前的适宜产区为基础,运用 ArcGIS 和 Maxent 模型,以气候因子、土壤因子、地形因子和植被类型数据为研究基础,筛选出太子参多糖含量较高的产区,进行生态适宜性区划,实现以保证太子参药材质量为目的又获得既满足适宜种植生长的区划指导。

1 材料与方法

1.1 样品材料

2013 年 7—8 月太子参药材采收期,于山东、福建、安徽、江苏、贵州共 5 个太子参栽培地区进行实地采样。在福建采集样品 13 份,江苏采集样品 3 份,安徽采集样品 10 份,贵州采集样品 16 份,山东采集样品 4 份,用于生态适宜区划分析的样品共计 46 份。

1.2 环境因子数据选取

本研究所用环境因子数据库为《中药资源空间信息网格数据库》,由中国中医科学院中药资源中心道地药材国家重点实验室提供。各环境因子的选取主要是依据对太子参药材产量和质量有重要影响的环境因子。

太子参喜温暖湿润气候,怕高温,抗寒力强,忌强光,有低温发芽、越冬的特性,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也可安全越冬。在选择区划因子时可选取极端温度如最暖季平均温、最冷季平均温等指标。太子参喜阴湿环境,气候的湿润度和光照强度也是影响太子参生长的重要因素^[6]。地形因子和土壤因子与太子参的生产种植息息相关,对于科学选址具有重要意义^[7-8]。此外,王晓鹏等人研究发现太子参群落物种多样性与太子参的生态环境及其生物学特性直接相关^[9]。故本文选取了温度、降水、日照等共 17 个生态因子。

因此,本文综合考虑太子参适宜种植区域和药材质量,选取了气候因子、土壤因子、地形因子及植被类型 4 个方面的环境因子数据用于全国太子参生态适宜性区划分析。其中,气候因子数据是根据 1950—2000 年间的气象观测数据插值而成(分辨率 1 km)。包括气温、降水等共 16 个气候因子。土壤因子数据根据第二次全国土地调查提供的《1:100 万中华人民共和国土壤图》(1995 年编制)制成,土壤分类系统为 FAO-90,主要包括土壤类型、土壤 pH 值、土壤含沙量、土壤含粘土量、土壤阳离子交换能力、土壤有效含水量等级、有机碳含量。地形因子数据包括高程、坡度、坡向,此外还有植被类型数据。

1.3 太子参多糖含量测定^[4]

1.3.1 仪器与试剂

GBC Cintra 20 紫外分光光度计(澳大利亚照生公司)。无水葡萄糖标准品(中国药品生物制品检定所,批号:110833-201205);浓硫酸、苯酚、乙醇均为分析纯。

1.3.2 对照品溶液制备

精密称取干燥至恒重的葡萄糖对照品 15.07mg 于 25mL 的量瓶中,用水定容,即得质量浓度为 $602.8\mu\text{g}/\text{mL}$ 的对照品溶液。

1.3.3 供试品溶液的制备

取本品粗粉约 0.1g,精密称定,置 100mL 圆底烧瓶中,加 80%乙醇 70mL,置水浴中加热回流 30min,趁热滤过,将残渣及滤纸置烧瓶中,加水 80mL,置 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中热浸 1h,趁热滤过,残渣用热水洗涤 3 次,每次 5mL,洗液并入滤液,放冷,转移至 100mL 量瓶中,加水至刻度,摇匀,精密量取 20mL,转移至 50mL 量瓶中,加水至刻度,摇匀,即得供试品溶液。

1.3.4 多糖的含量测定

精密量取上述对照品和供试品溶液各 2.0mL,分别置 25mL 试管中,精密加入 4%苯酚溶液 1mL,混匀,迅速滴加浓硫酸各 5mL,摇匀,放置室温。于 487nm 处测定,共测太子参样品 46 份。

1.4 区划分析方法

本研究首先 46 份采样地的多糖进行聚类分析,筛选得到多糖含量较高的产地,再对筛选到的采样地利用空间信息分析技术(ArcGIS)对全国栽培太子参进行空间数据分析,并结合最大信息熵模型(Maxent)进行适

生区域的模拟。

2 结果与分析

各采样地太子参经纬度及多糖含量信息见表 1。

表 1 不同采样地太子参样品信息

Table 1 Different samples of *P. heterophylla* information

编号 Number	产地 Origin	海拔/m Altitude	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	多糖/% Polysaccharide
1	福建寿宁县武曲镇大韩村	92	119.5521	27.2567	31.06
2	福建寿宁县南洋镇韩头村	558	119.5730	27.3816	32.44
3	福建福安市潭头镇东昆村	55	119.6698	27.1846	33.11
4	福建福安市上白石镇财洪村	84	119.7018	27.2248	27.23
5	福建柘荣县楮坪乡彭家山村	635	119.7767	27.2468	27.49
6	福建柘荣县英山乡田头洋村	853	119.8198	27.2754	31.30
7	福建柘荣县东源乡岩潭村	683	119.9031	27.2032	30.13
8	福建柘荣县东源乡东岩村	1041	119.9288	27.1418	28.96
9	福建柘荣县宅中乡宅中村	556	119.8598	27.1223	33.44
10	福建霞浦县柏洋镇柏洋村	603	119.8689	27.0502	33.49
11	福建柘荣县乍洋乡洋头村	72	119.9722	27.2421	33.44
12	福建柘荣县乍洋乡石山村	417	120.0046	27.1874	28.30
13	福建福鼎市管阳镇管阳村	578	120.0356	27.2565	32.20
14	江苏镇江市丹徒区高资镇	10	119.3121	32.1681	33.42
15	江苏句容市方山茶场	142	119.2863	31.7178	30.18
16	江苏省句容市袁巷乡马埂村	55	119.2683	31.6809	32.44
17	安徽霍山县落儿岭镇古桥畈村 1	143	119.1887	31.3618	27.99
18	安徽霍山县落儿岭镇古桥畈村 2				26.85
19	安徽舒城县马河口镇杨家村	45	116.9111	31.3784	31.13
20	安徽舒城县孔集镇舒丰村	14	117.0169	31.4515	31.15
21	安徽六安市裕安区分路口镇莲花庵村	42	116.3838	31.7395	37.03
22	安徽广德县东亭乡阳岱山	102	119.5363	30.8157	27.66
23	安徽宣城市黄渡乡汤村	83	118.8000	30.8052	22.61
24	安徽宣城市向阳乡板桥村 1	50	118.7949	30.8637	27.51
25	安徽宣城市向阳乡板桥村 2				29.63
26	安徽广德县誓节镇花鼓村	50	119.2494	30.9200	32.63
27	贵州施秉县城关镇新红村	776	118.0884	26.9878	38.08
28	贵州黔西县锦星镇白泥村	1270	105.9230	26.9885	29.75
29	贵州玉屏县田坪镇长冲垅村	520	109.1167	27.4090	30.99
30	贵州施秉县牛大场镇石桥村	1076	108.0220	27.2158	35.22
31	贵州施秉县城关镇下翁哨村	778	108.1773	27.0689	39.41
32	贵州贵阳市清镇王庄乡罗田村	1252	106.2601	26.7667	33.20
33	贵州丹寨县扬武乡黑石头农场	860	107.8784	26.1817	30.63
34	贵州平塘县白龙乡龙兴村	780	107.2704	25.9278	35.30
35	贵州施秉县牛大场镇牛大场村	934	107.9253	27.1402	32.75
36	贵州贵阳市花溪区马铃乡	1078	106.5864	26.2742	29.08
37	贵州镇远县涌溪乡花滩村	649	108.3457	27.0058	28.04
38	贵州福泉市龙昌镇老落田	1016	107.4640	26.7735	29.94
39	贵州施秉县甘溪乡盐井村	1100	108.2400	27.0647	25.87
40	贵州余庆县白泥镇民同村	780	107.9029	27.2128	21.54
41	贵州施秉县甘溪乡高碑村	640	108.2214	27.0433	27.99
42	贵州黄平县一碗水乡水淹塘村	970	107.8918	27.1316	30.94
43	山东临沂市临沭县南古镇	56	118.5475	34.9143	32.20
44	山东临沂市罗庄区册山后村	66	118.3435	34.9210	32.15
45	山东临沂市沂南县葛沟镇居泉村	137	118.5727	35.3567	28.68
46	山东临沂市河东区重沟镇万家湖村	71	118.5049	34.9867	32.73

2.1 基于多糖的太子参采样点筛选

聚类分析结果显示,当聚类距离为 5 时,46 个样地的多糖含量聚为 I、II、III、IV 4 类,其中 IV 类的 23(安徽宣城黄渡乡)和 40(贵州余庆)样地的多糖含量最低,可筛掉这一类;III 类中的 21(安徽六安市)、27(贵州施秉新红村)和 31(贵州施秉下翁哨村)样地的多糖含量最高,可保留;其余两类样地又可分为①、②、③、④,依据多糖含量高低,②这一类的多糖含量最高,而①和④的多糖含量均在 31%左右,综合考虑到不同产区样地代表性和多糖含量,故筛掉多糖含量低的③类中的 17(安徽霍山县古桥畈村 1)、41(贵州施秉甘溪乡)等 10 个样地,最后筛选得到的样地共计 34 个(见表 2)。对 34 个产地不同省区多糖比较可以看出(图 2),5 个省区的太子参多糖含量差异不大,均在 31—32%左右,且以贵州省的多糖含量最高(32.94%),山东省的最低(31.44%)。34 个产地的太子参药材质量均差异性不大(5.91%),可以看作全国太子参的代表性产区。因此,将 34 个太子参药材质量较好的采样点进行数据处理及格式转换,用于太子参的生态适宜性区划分析。

2.2 环境因子指标的筛选

本研究共选取了 27 个环境因子指标。基于筛选得到的 34 个采样点信息,通过 Maxent 模型第一次运算后,得到各环境因子的贡献率(见表 3)。贡献率的大小代表各环境因子对模型模拟结果的重要性。从表 3 可以看出,最干月降水量指标贡献率最大,达到 65.8%,这表明干旱对太子参长势和质量影响较大。贡献率大小进行筛选,得到最干月降水量、土壤类型、年平均气温、坡向、等温性、最暖季降水量、植被类型、最暖季平均温、最湿季降水量共 9 个环境指标,用于下一步的数据分析。

将筛选得到的 9 个环境因子指标进行第二次模型分析预测,得到全国太子参生态适宜性区划分析结果,利用 ArcMap 中的自然区间分类法将模型计算得到的生境适宜度进行聚类分析,分为最适宜区、适宜区和不适宜区(图 3)。由图中可知,绿色区域代表不适宜太子参种植,红色区域则最适宜太子参种植。因此,太子参适宜种植区主要集中在东南部,其中最适宜区主要集中在贵州省大部分,重庆与湖南、湖北接壤处,河南南部,安徽西部,江苏中部,福建东北部以及浙江部分区域。

根据 Maxent 模型分析,得到 9 个环境因子对太子参分布影响的重要性(见表 4),最干月降水量对太子参区划的影响最大,贡献率达 68.4%,植被类型和最湿季降水量的贡献率最小,仅为 1.7%。按照贡献率从大到小的顺序以及贡献率差值大小,选取最干月降水量、土壤类型、最暖季平均温、等温性这 4 个指标进一步分析研究。

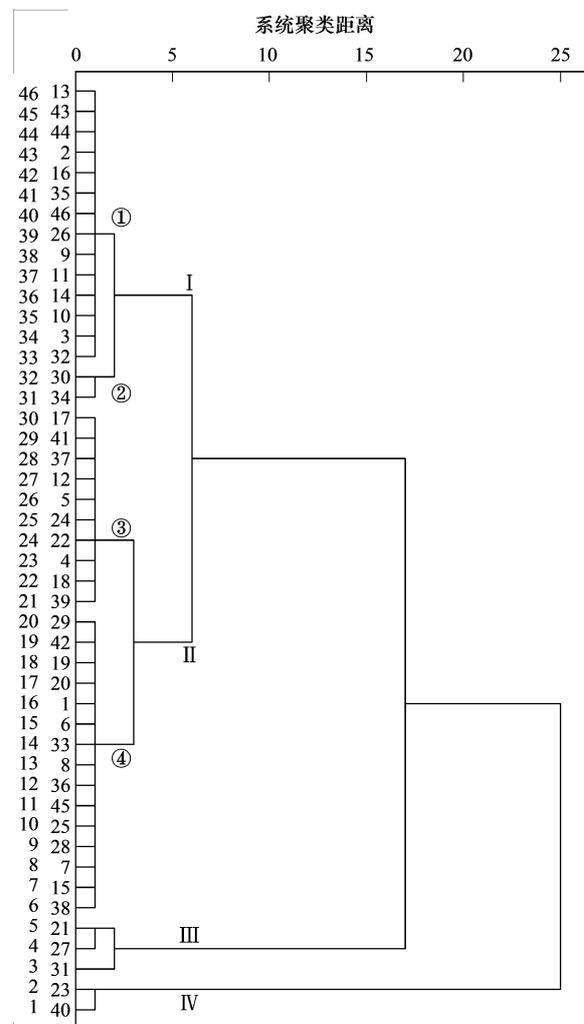


图 1 太子参多糖含量聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of polysaccharide content

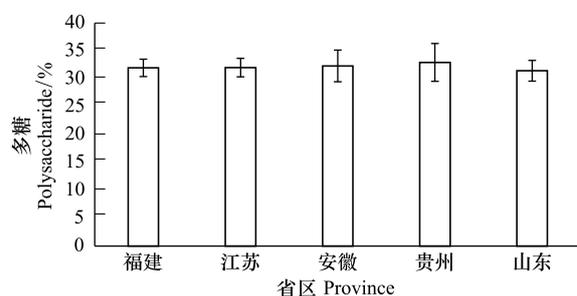


图 2 不同省区太子参多糖含量比较

Fig.2 Polysaccharide comparison in different provinces

表 2 34 个采样点太子参多糖及环境因子信息
Table 2 Polysaccharide and environmental factors information of *P. heterophylla* from 34 sampling sites

编号 Number	产地 Origin	海拔/m Altitude	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	最湿季 降水量/mm The wet season precipitation	最暖季 降水量/mm The most warm rain	最暖季平 均温/°C * 10 The most warm average temperature	最干月 降水量/mm The driest month precipitation	年平均气 温/°C * 10 Annual average temperature	生境适 宜度/% Habitat suitability	多糖/% Polysac- charide
1	福建寿宁县武曲镇大韩村	92	119.5521	27.2567	662	508	275	39	188	47.4914	31.06
2	福建寿宁县南洋镇韩头村	558	119.5730	27.3816	708	668	246	42	162	81.5788	32.44
3	福建福安市潭头镇东昆村	55	119.6698	27.1846	644	516	277	39	190	52.3053	33.11
6	福建柘荣县英山乡田头洋村	853	119.8198	27.2754	702	635	230	45	149	69.6048	31.30
7	福建柘荣县东源乡岩潭村	683	119.9031	27.2032	674	620	235	44	154	82.5004	30.13
8	福建柘荣县东源乡东岩村	1041	119.9288	27.1418	710	710	218	48	139	43.6033	28.96
9	福建柘荣县宅中乡中村	556	119.8598	27.1223	661	596	246	43	163	47.0337	33.44
10	福建霞浦县柏洋镇柏洋村	603	119.8689	27.0502	653	585	249	44	166	86.8971	33.49
11	福建柘荣县乍洋乡洋头村	72	119.9722	27.2421	685	637	229	46	147	53.7182	33.44
13	福建福鼎市管阳镇管阳村	578	120.0356	27.2565	646	607	244	43	161	81.4024	32.20
14	江苏镇江市丹徒区高资镇	10	119.3121	32.1681	469	469	272	30	156	7.9118	33.42
15	江苏句容市方山茶场	142	119.2863	31.7178	473	473	267	34	154	78.3844	30.18
16	江苏句容市袁巷乡马埂村	55	119.2683	31.6809	473	473	267	34	154	44.6806	32.44
19	安徽舒城县马河口镇杨家村	45	116.9111	31.3784	518	518	270	29	161	87.3114	31.13
20	安徽舒城县孔集镇舒丰村	14	117.0169	31.4515	477	477	272	29	162	51.7496	31.15
21	安徽六安市裕安区分路口镇莲花庵村	42	116.3838	31.7395	487	487	270	29	159	65.9115	37.03
25	安徽宣城市向阳乡板桥村 2	50	118.7949	30.8637	522	504	274	40	162	79.1600	29.63
26	安徽广德县誓节镇花鼓村	50	119.2494	30.9200	511	511	269	40	160	81.9807	32.63
27	贵州施秉县城关镇新红村	776	118.0884	26.9878	522	471	253	27	163	81.6865	38.08
28	贵州黔西县锦星镇白泥村	1270	105.9230	26.9885	550	539	230	19	151	83.7251	29.75
29	贵州玉屏县田坪镇长冲垅村	520	109.1167	27.4090	486	457	251	31	156	69.4160	30.99
30	贵州施秉县牛大场镇石桥村	1076	108.0220	27.2158	538	489	236	28	146	67.3183	35.22
31	贵州施秉县城关镇下翁哨村	778	108.1773	27.0689	515	468	256	27	164	51.5756	39.41
32	贵州贵阳市清镇王庄乡罗田村	1252	106.2601	26.7667	588	556	234	19	154	46.7765	33.20
33	贵州丹寨县扬武乡黑石头农场	860	107.8784	26.1817	598	537	238	28	157	64.7208	30.63
34	贵州平塘县白龙乡龙兴村	780	107.2704	25.9278	617	562	249	23	173	68.5883	35.30
35	贵州施秉县牛大场镇牛大场村	934	107.9253	27.1402	533	481	244	27	154	79.7417	32.75
36	贵州贵阳市花溪区马铃乡	1078	106.5864	26.2742	621	572	242	19	165	66.7388	29.08
38	贵州福泉市龙昌镇老落田	1016	107.4640	26.7735	562	505	239	26	155	86.1484	29.94
42	贵州黄平县一碗水乡水淹塘村	970	107.8918	27.1316	530	478	248	27	158	67.5955	30.94
43	山东临沂市临沭县南古镇	56	118.5475	34.9143	532	532	257	12	137	34.0780	32.20
44	山东临沂市罗庄区册山后村	66	118.3435	34.9210	516	516	260	11	140	43.3089	32.15
45	山东临沂市沂南县葛沟镇居泉村	137	118.5727	35.3567	550	550	246	10	127	26.7045	28.68
46	山东临沂市河东区重沟镇万家湖村	71	118.5049	34.9867	535	535	257	11	137	63.0004	32.73

表 3 各环境因子贡献率大小
Table 3 Contribution rate of environmental factors

编号 Number	变量 Variable	贡献率/% Contribution rate	编号 Number	变量 Variable	贡献率/% Contribution rate
1	最干月降水量	65.8	15	最冷月最低温	0.4
2	土壤类型	9.9	16	土壤有效含水量等级	0.1
3	年平均气温	4.8	17	土壤含沙量	0.1
4	坡向	3.5	18	最冷季平均温	0
5	等温性	2.7	19	土壤有机碳含量	0
6	最暖季降水量	2.2	20	土壤阳离子交换能力	0
7	植被类型	1.9	21	昼夜温差月均值	0
8	最暖季平均温	1.9	22	最干季平均温	0
9	最湿季降水量	1.7	23	土壤含粘土量	0
10	最湿月降水量	1.3	24	最湿季平均温	0
11	最干月降水量	1.1	25	最暖月最高温	0
12	坡度	1.1	26	最冷季降水量	0
13	高程	0.7	27	土壤 pH	0
14	年均降水量	0.5			

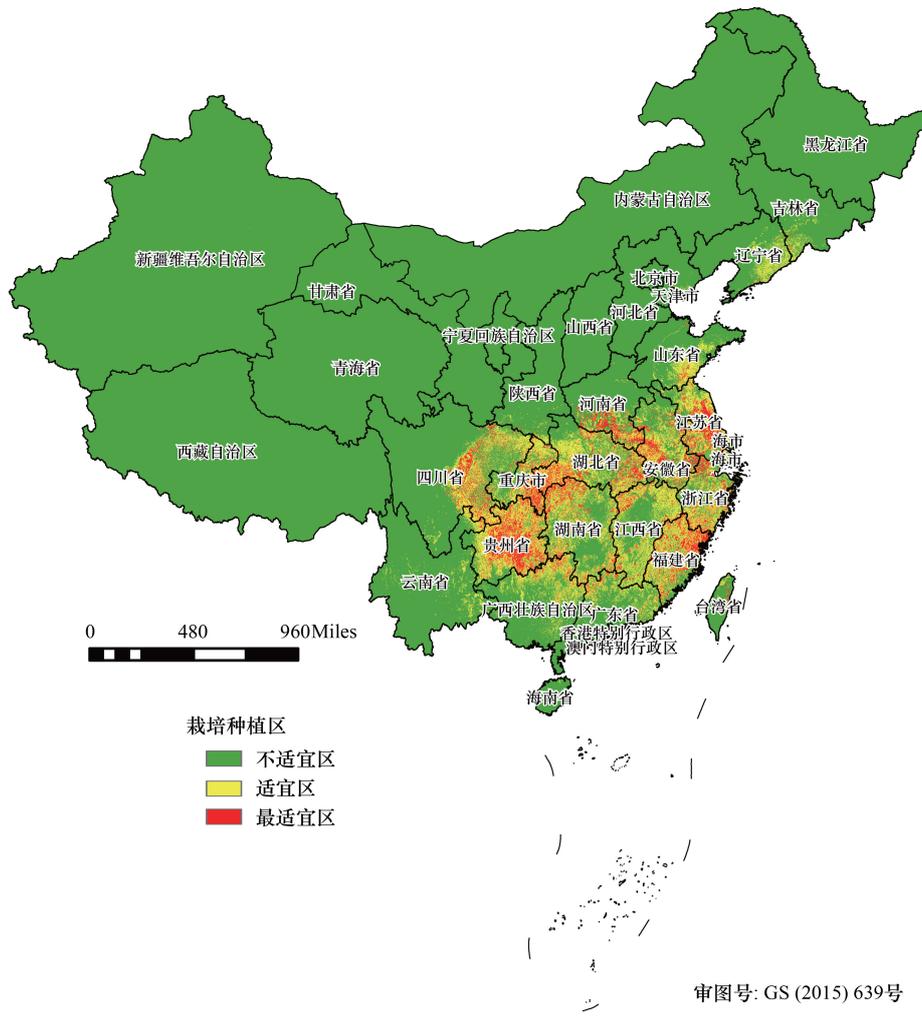


图 3 栽培太子参生态适宜种植区分布图(审图号 GS(2015)639 号)

Fig.3 Ecological suitable planting regions of *P. heterophylla*

表 4 9 个环境因子贡献率大小

Table 4 Contribution rate of 9 environmental factors

编号 Number	变量 Variable	贡献率/% Contribution rate	编号 Number	变量 Variable	贡献率/% Contribution rate
1	最干月降水量	68.4	6	年平均气温	2.9
2	土壤类型	9.7	7	最暖季降水量	2.4
3	最暖季平均温	6.0	8	植被类型	1.7
4	等温性	4.0	9	最湿季降水量	1.7
5	坡向	3.2			

2.3 太子参适宜生境的筛选

通过 Maxent 模型分析,得到不同环境因子对太子参存在概率的响应曲线,各环境因子对太子参栽培种植的影响程度各不相同,其中纵坐标越大,代表环境因子范围越适宜太子参种植,存在的概率也就越大。本研究选取对太子参分布影响较大的最干月降水量、土壤类型、最暖季平均温、等温性 4 个环境因子进行单一指标的生境适宜度分析,筛选最佳适宜生境范围。见图 4—图 7。

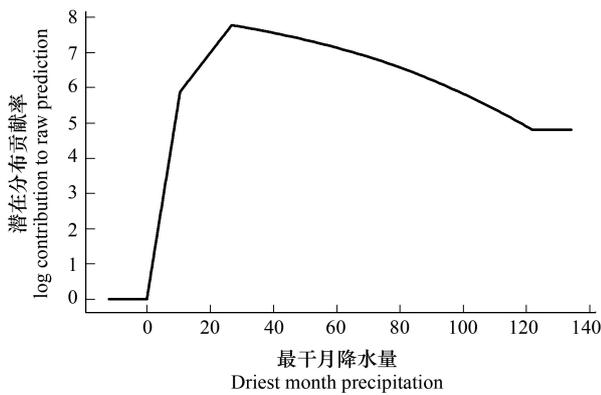


图 4 最干月降水量响应曲线

Fig.4 Driest month precipitation response curve

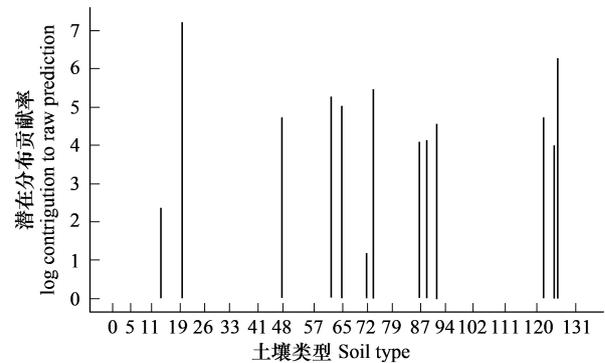


图 5 土壤类型响应曲线

Fig.5 Soil response curve

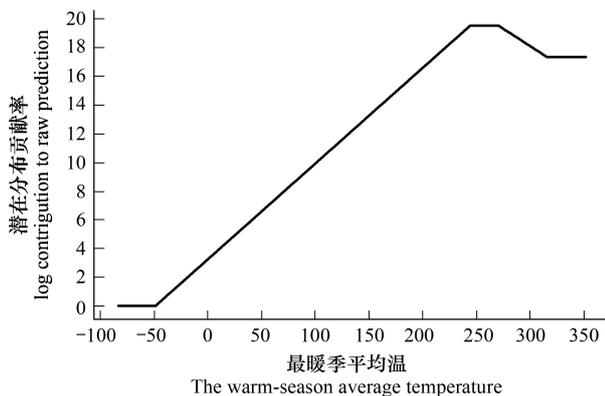


图 6 最暖季平均温响应曲线

Fig.6 The warm-season average temperature response curve

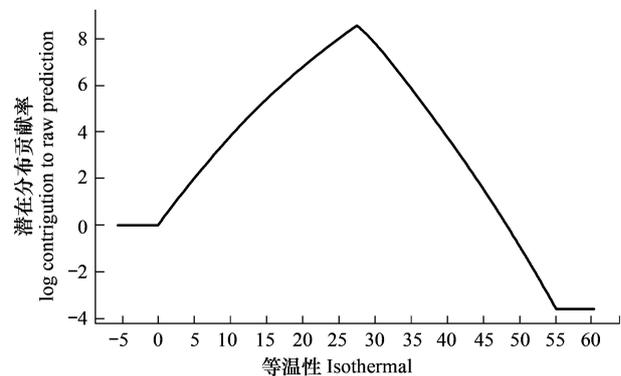


图 7 等温性的响应曲线

Fig.7 Isothermal response curve

最干月降水量是决定太子参分布的重要影响因素,根据最干月降水量响应曲线,得到最干月降水量的最适宜范围为 20—60mm。依据相同方法对其他 6 个环境因子进行分析,得到最适宜太子参生长的土壤类型代码为 20(不饱和薄层土)、65(饱和粘磬土即黄棕壤)、74(深色淋溶土即黄壤)、126(黄红壤);最暖季平均温为

21.5—30.5°C;等温性为昼夜温差月均值与年均温变化范围的百分比,其值在 18—35%。通过上面环境因子范围划分后,得到了太子参最适宜的生境条件,可在人工调控下指导种植。

2.4 适宜性区划结果的评价分析

ROC 曲线分析方法在物种潜在分布模型的评价中应用较为广泛^[10]。ROC 曲线下的面积为 AUC 值,取值在 0.5—1.0 之间。AUC 值越大表示环境变量与预测的物种地理分布模型之间的相关性越大,即模型的预测效果越好。一般,AUC 值在 0.9—1.0 范围内,表示预测效果极好;0.8—0.9 表示预测效果好,0.7—0.8 表示效果一般,而 0.7 以下的则模型预测的效果较差^[11]。由图 8 可知,训练集的 AUC 值为 0.993,测试集的 AUC 值为 0.975,说明本研究成果的栽培太子参生态适宜种植区划分析结果是准确的,可为太子参的生产布局提供一定的理论依据。

2.5 生境适宜度及环境因子与化学成分的相关性分析

通过区划分析及数据的提取,得到全国各采样点的太子参生境适宜度。结果显示,不同采样点太子参生境适宜度差异较大,其中安徽六安舒城县马河口镇杨家村的样品生境适宜度最大,为 87.3114%,其多糖含量为 31.13%;江苏镇江丹徒高资镇的太子参样品生境适宜度最小,仅为 7.9118%,但其多糖含量较高,达 33.42%。通过 ArcMap 提取了 34 个采样点的最湿季降水量、最暖季降水量、最暖季平均温、最干月降水量及年平均气温 5 个对太子参生长贡献率较大的连续型气候因子数据。相关分析结果显示,生境适宜度与 5 个气候因子均无显著相关性($P>0.05$),且多糖也与其他指标无显著相关性($P>0.05$)。说明太子参多糖这一指标与环境因子的相关性不明显,不是环境主导型的化学成分指标。

3 讨论与结论

在生态适宜区划研究中,生态位理论的模型已有较多应用,其原理主要是利用已有的物种分布资料和生态数据产生以生态位为基础的物种生态需求,探索物种已知分布区的环境特征与潜在分布区的非随机关系。曹向峰等^[12]采用 GARP、Maxent、ENFA、Bioclim 和 Domain5 个模型预测黄顶菊的潜在分布区,结果 Maxent 模型的模拟精度最好。同时,Maxent 模型也是目前区划研究中应用较多的信息熵模型。因此,本研究选用 Maxent 模型对全国太子参进行生态适宜区划,由 ROC 曲线得到的 AUC 预测值均达到 0.9,验证该模型是可靠、准确的,且结果具有较高的可信度。

通过对环境指标的优选并结合生产实际,得到太子参优生生长环境:最适宜的最干月降水量为 20—60mm;土壤类型为不饱和薄层土(Dystric Leptosols)、饱和粘壤土即黄棕壤(Eutric Planosols)、深色淋溶土即黄壤(Chromic Luvisols)、黄红壤(Ferric Alisols);最暖季平均温为 215—305mm 最适宜太子参生长;等温性(昼夜温差月均值与年均温变化范围的百分比)为 18%—35%。

传统的中药材市场是以外观品质作为定价依据,已有的研究表明多糖含量的高低可间接反映药材品质的好坏^[13-14]。因此,基于太子参多糖指标进行生态适宜区划,在验证基于环境因子区划结果准确性的同时,可达到既满足适宜种植生长又保证药材质量的目的。从本文分析结果来看,太子参最适宜的种植区主要有:贵州省黔东南州的雷山县、施秉县、黄平县、凯里市、麻江县、丹寨县,黔南州的福泉市、都匀市、龙里县、贵定县、瓮安县、平塘县东部,贵阳市清镇市、修文县、息烽县、开阳县,毕节黔西县、金沙县,遵义市汇川区、红花岗区、遵义县、仁怀市东南部、湄潭县、桐梓县中部,铜仁松桃县。重庆市黔江区、酉阳县、彭水县。四川省乐山市马边县,眉山市乐寿县,成都市崇州市、双流县。湖南省常德市石门县,张家界市桑植县,湘西州龙山县、花垣县。

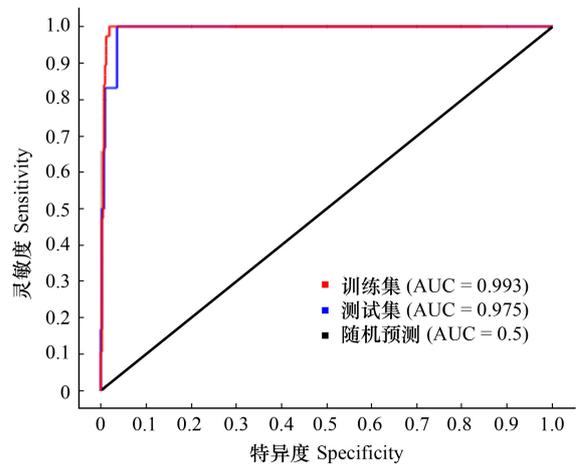


图 8 Maxent 模型模拟的 ROC 变化曲线

Fig.8 The curve of ROC for Maxent model simulations

表 5 各环境因子和化学成分指标间相关性分析
Table 5 Correlation analysis of various environmental factors and chemical index

指标 Index	海拔 Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	最湿季降水量 The wet season precipitation	最暖季降水量 The warmest rain	最暖季平均温 The warmest average temperature	最干月降水量 The driest month precipitation	年平均气温 Annual average temperature	生境适宜度 Habitat suitability	多糖 Polysaccharide
海拔 Altitude	1.000	-0.690**	-0.734**	0.323	0.252	-0.775**	-0.036	-0.037	0.324	-0.019
经度 Longitude	-0.690**	1.000	0.437**	0.221	0.315	0.328	0.455**	-0.043	-0.207	-0.046
纬度 Latitude	-0.734**	0.437**	1.000	-0.556**	-0.292	0.521**	-0.464**	-0.509**	-0.405*	-0.127
最湿季降水量 The wet season precipitation	0.323	0.221	-0.556**	1.000	0.880**	-0.555**	0.536**	0.186	0.114	-0.173
最暖季降水量 The most warm rain	0.252	0.315	-0.292	0.880**	1.000	-0.636**	0.441**	-0.174	0.062	-0.275
最暖季平均温 The most warm average temperature	-0.775**	0.328	0.521**	-0.555**	-0.636**	1.000	-0.080	0.436*	-0.154	0.183
最干月降水量 The driest month precipitation	-0.036	0.455**	-0.464**	0.536**	0.441**	-0.080	1.000	0.402*	0.265	-0.024
年平均气温 Annual average temperature	-0.037	-0.043	-0.509**	0.186	-0.174	0.436*	0.402*	1.000	0.241	0.243
生境适宜度 Habitat suitability	0.324	-0.207	-0.405*	0.114	0.062	-0.154	0.265	0.241	1.000	-0.037
多糖 Polysaccharide	-0.019	-0.046	-0.127	-0.173	-0.275	0.183	-0.024	0.243	-0.037	1.000

“*”表示在95%的置信度下相关性显著;“**”表示在99%的置信度下相关性显著

河南省南阳市桐柏县,驻马店市泌阳县,信阳市平桥区、潢川县、固始县。安徽省六安市,宣城市宣州区、广德县、泾县,黄山市黄山区。江苏省镇江市句容县,南京市江宁区,南通市海安县、如皋县,泰州市兴化县、泰兴市、姜堰市,盐城市盐都区。浙江省湖州市长兴县、安吉县,杭州市萧山区,绍兴市新昌县,台州市天台县。福建省宁德市福鼎市、福安市、寿宁县、柘荣县、霞浦县、蕉城区、屏南区,福州市晋安区、罗源县、连江县、闽侯县、永泰县,南平市建瓯市、政和县、浦城县,泉州市德化县,龙岩市连城县东部。江西省赣州市崇义县,郴州市桂东县中西部。此外,山东临沂市和台湾桃园县、花莲县等地区也适宜种植。

中药材质量优劣不仅与生物因素有关,环境因素也是影响其品质好坏的重要方面。药材的产地环境与药材的质量和产量密切相关。现今太子参的栽培主产区也是经过对环境的长期适应而逐渐形成的。已有较多关于中药材质量与环境的相关分析报道,均表明环境条件对于药材质量的重要性^[15-17]。生境适宜度的高低可间接反映栽培太子参适宜生长种植的情况,已作为评价生态适宜区种植好坏的重要指标,对指导太子参的科学选址具有重要意义。相关性分析表明,生境适宜度和多糖含量与最湿季降水量、最暖季降水量、最暖季平均温、最干月降水量及年平均气温等 5 个环境因子相关性不明显,可推测出生境适宜度并不受单一因素影响,而是多因素综合作用的结果,同时还可得出多糖并不是环境主导型的药效成分。此外,寻找环境主导型的太子参药材药效组分,对于合理区划生态布局、科学种植及尝试药材定向培育具有重要指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 杨俊,王德群,姚勇,靳雪飞. 野生太子参生物学特性的观察. 中药材, 2011, 34(9): 1323-1328.
- [2] 肖承鸿,周涛,江维克,艾强,杨昌贵,熊厚溪,廖明武. 栽培太子参的遗传多样性与质量分析. 中草药, 2014, 45(9): 1319-1325.
- [3] 夏伦祝,徐先祥,张睿. 太子参多糖对糖尿病大鼠糖、脂代谢的影响. 中国药业, 2009, 18(9): 17-19.
- [4] 杨昌贵,江维克,周涛,肖承鸿,艾强,张代金. 不同种源太子参中多糖和氨基酸含量的比较研究. 中国现代中药, 2014, 16(1): 32-37.
- [5] 晏春耕,曹瑞芳. 太子参药材性状与多糖含量的研究. 安徽农业通报, 2009, 15(11): 81-82.
- [6] 梁平,王洪斌,龙先菊,卢君,袁芳菊. 黔东南州种植太子参的气候生态适宜性分区研究. 中国农业气象, 2008, 29(3): 329-332.
- [7] 严睿文,李玉成. 太子参及其种植土壤中 16 种元素的测定. 现代生物医学进展, 2008, 8(2): 36-38.
- [8] 黄东寿,王树贵. 福建“柘荣太子参”栽培环境的道地性研究. 中国野生植物资源, 2010, 29(2): 12-14.
- [9] 王晓鹏,刘胜祥,代东进. 安徽皇甫山野生太子参生态环境分析. 生态学杂志, 2003, 22(4): 93-96.
- [10] 王运生,谢丙炎,万方浩,肖启明,戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [11] 钟良平. 几种外来入侵杂草在我国的潜在分布预测[D]. 重庆:西南大学, 2008.
- [12] 曹向峰,钱国良,胡白石,刘凤权. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3068.
- [13] 康传志,周涛,江维克,肖承鸿,郭兰萍. 我国太子参栽培资源现状及药材品质的探讨. 中国现代中药, 2014, 16(7): 542-546.
- [14] 康传志,周涛,郭兰萍,韩邦兴,黄璐琦,肖承鸿,熊厚溪,陈雪梅. 太子参商品规格等级标准研究. 中国中药杂志, 2014, 39(15): 2873-2880.
- [15] 周涛,杨占南,江维克,艾强,郭培果. 民族药大果木姜子果实挥发油成分的变异及其规律. 中国中药杂志, 2010, 35(7): 852-856.
- [16] Ma W F, Zhou T, Jiang W K, He Y, Zhu S D, Guo L P. The spatial structure and geographic distribution of major active component in medical herb *Dipsacus asperoides* population. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(20): 3419-3422.
- [17] Wang S Z, Zhang L H, Xu X L, Li Y J, Xu X P. Effect studies of environment and ecological conditions on wheat quality. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1994, 9(S): 141-144.