

基于MaxEnt模型的丹参全球潜在生态适宜产区分析^Δ

高 铭^{1*},倪淑萍²,沈 亮³(1.枣庄市山亭区人民医院,山东 枣庄 277200;2.枣庄市山亭区妇幼保健院,山东 枣庄 277200;3.中国中医科学院中药研究所,北京 100700)

中图分类号 R282.2 文献标志码 A 文章编号 1001-0408(2018)16-2243-05
DOI 10.6039/j.issn.1001-0408.2018.16.18

摘要 目的:为丹参科学引种和规范栽培提供参考。方法:查阅全球生物多样性信息网络数据库等并结合实地调研情况,收集文献记载的野生分布区、栽培主产区及历史分布区共697个丹参样点,采用Spearman系数法对35个生态因子进行相关性检验,并结合文献筛选生态因子指标,建立MaxEnt预测模型,采用刀切法中的ROC曲线评价预测模型的准确度,再根据模型计算出丹参在全球范围内的存在概率,进而利用ArcGIS 10.3软件绘制丹参全球范围内的潜在生态适宜产区图。结果:筛选出6个环境因子指标,分别为年均温、最热季均温、最冷季均温、年均降水量、年均日照和年均相对湿度。刀切法分析表明,气温是影响丹参分布的重要生态因子。丹参全球潜在生态适宜产区主要分布在亚洲东部和北美洲中东部等地区,其生态适宜产区面积约为 79.16×10^5 km²。全球范围内适宜丹参种植的国家主要有中国、美国、俄罗斯、日本、韩国、朝鲜等;我国的丹参潜在生态适宜产区主要包括湖南、湖北、河南、江西、山东等地。结论:全球范围内丹参潜在生态适宜产区主要为亚洲东部及北美洲中东部地区,在引种栽培过程中需要注意种植基地的选择及种植温度的调控,以促进高品质丹参药材的生产。

关键词 丹参;MaxEnt模型;生态适宜产区;生态因子;全球

Analysis of Global Potential Ecological Suitable Producing Area for *Salvia miltiorrhiza* Based on MaxEnt Model

GAO Ming¹, NI Shuping², SHEN Liang³ (1. Zaozhuang Shanting District People's Hospital, Shandong Zaozhuang 277200, China; 2. Zaozhuang Shanting District Maternal and Child Care Service Centre, Shandong Zaozhuang 277200, China; 3. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

ABSTRACT OBJECTIVE: To provide reference for scientific introduction and standard cultivation of *Salvia miltiorrhiza*. METHODS: By reviewing global biodiversity information network database, etc., based on field research, 697 *S. miltiorrhiza* sample sites were collected from wild distribution area, main production area and historical distribution area recorded in literature. Spearman coefficient method was used for correlation test of 35 ecological factors. MaxEnt prediction model was established according to literature screening ecological factor index, and using the ROC curve in the Jackknife method to evaluate the accuracy of the prediction model. According to the model, existence probability of *S. miltiorrhiza* globally was calculated. ArcGIS 10.3 software was used to draw global potential ecological suitable areas of *S. miltiorrhiza*. RESULTS: Totally 6 environment factor indexes were screened, including mean annual temperature, mean temperature of the hottest season, mean temperature of the coldest season, annual precipitation, annual sunshine and annual relative humidity. Jackknife method showed temperature was an important environmental factor affecting the distribution of *S. miltiorrhiza*. The potential ecological suitable areas of *S. miltiorrhiza* were mainly in the eastern Asia and central and eastern of North America, and ecological suitable areas for *S. miltiorrhiza* was 79.16×10^5 km². At the global level, *S. miltiorrhiza* mainly distributed in China, the United States, Russia, Japan, South Korea, North Korea, etc. The potential ecological suitable areas in China mainly included Hunan, Hubei, Henan, Jiangxi, Shandong, etc. CONCLUSIONS: The potential ecological suitable areas for *S. miltiorrhiza* are mainly in the eastern Asia and central and eastern of North America. In the process of introduction and cultivation, great attention should be attached to the selection of planting base and the regulation of the growth temperature of *S. miltiorrhiza*, so as to promote the production of high quality *S. miltiorrhiza*.

KEYWORDS *Salvia miltiorrhiza*; MaxEnt model; Ecological suitable area; Ecological characteristics; Worldwide

丹参为唇形科鼠尾草属多年生药用植物丹参(*Salvia miltiorrhiza* Bge.)的干燥根及根茎,具有活血化瘀、

养血安神、降低血压等功效^[1]。丹参主要含有丹参素、丹酚酸、丹参酮、原儿茶醛、咖啡酸、迷迭香酸、紫草酸等化学成分^[2]。近年来,随着对丹参抗氧化、抗凝血、抗血栓等药理活性的深入研究,其新的药用价值不断被发现,加之心脑血管疾病患者逐年增加,其原料需求量逐年上

^Δ 基金项目:中国博士后科学基金资助项目(No.2017M611128)

* 主治医师。研究方向:中药学、外科临床。E-mail:stqrmmywk@163.com

升^[3]。作为根类药材,丹参人工种植一直存在连作障碍问题,导致丹参可用栽培土地逐年减少,现已严重威胁丹参种植产业的健康发展^[4]。为实现该药材资源的可持续利用,避免盲目引种扩种带来的经济损失,利用生态位模型开展丹参全球潜在生态适宜产区预测具有重要意义。

生态位模型是依据一定数学算法,利用物种已知的产地分布数据及与其生长显著相关的环境变量构建的产地划区模型,主要用来预测物种的潜在适宜分布区域^[5]。该模型的出现为研究物种保护、进化及推广种植提供了科学高效的分析工具。目前常用的生态位预测模型主要有最大熵模型(MaxEnt)、基因遗传算法(GARP)、药用植物全球产地生态适宜性区划信息系统(GMPGIS)等^[6-8],其中MaxEnt模型是基于最大熵原理提出的生态位模型,该模型具有预测精度高、操作简单、运算速度快等优点,在物种保护、种植区划及有害生物防治等领域得到了广泛应用^[9]。本研究应用MaxEnt模型分析了全球范围内的丹参潜在生态适宜区域,旨在为丹参科学引种和规范栽培提供参考,并为高品质丹参药材生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 样点采集

在全球范围内对丹参主要分布区域进行样点选取,包括丹参野生分布区、栽培主产区及历史分布区^[10]。查阅全球生物多样性信息网络数据库(GBIF, <http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、英国丘园(<http://apps.kew.org/>)、中国知网等^[11],并结合本课题组在山东、陕西等丹参种植产区调查的工作记录^[12-13],剔除产地有误或重复的样点;没有经纬度信息的标本依据采样地点采用Google Earth软件进行经纬度坐标查找,最终共收集了697个丹参样点,用于丹参全球潜在生态适宜产区分析,详见图1[图1经国家测绘地理信息局审核,审图号为:GS(2016)1766号,图4同]。

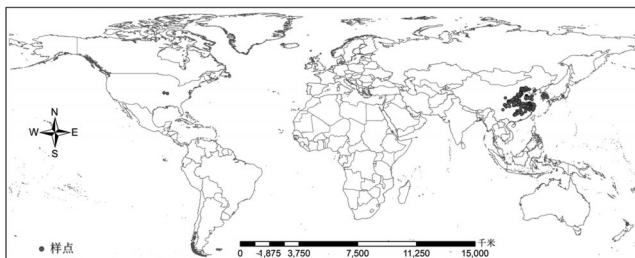


图1 丹参样点分布图

Fig 1 Distribution of sample site of *S. miltiorrhiza*

1.2 气候变量的选择

本研究气候变量数据来自CliMond数据库(<http://www.climond.org/>)1950—2000年的监测数据。该数据库共有35个生态因子,坐标系为WGS84,主要包括年均、季均及月均温/湿度、年均日照、年均降水量等指标,气候栅格数据的分辨率为 $10''$ ^[14]。基础地理信息数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.geodata.cn/Portal/index.jsp>)。为了避免各生态因子间共线性造成模型预测结果的过度拟合^[15],本研究采用Spearman系数法对35个生态因子进行了相关性检验:若两个因子的相关系数 ≥ 0.75 ,则留下其中生态意义较为重要的因子,相关系数 < 0.75 的因子则全部保留^[16];同时,依据影响药用植物生长的关键环境因子,结合相关文献报道,本研究最终选取了6个生态因子用于后续分析,即年均温、最热季均温、最冷季均温、年均降水量、年均日照和年均相对湿度^[17-18]。

1.3 模型的建立与评价

由于MaxEnt模型可以根据物种分布的样点信息和环境变量数值分析该物种的生态位需求,并预测其潜在分布地区^[19],因此本研究拟采用MaxEnt模型进行分析。先通过丹参实际分布样点的环境变量采用MaxEnt 3.3.3软件建立MaxEnt预测模型,再根据模型计算出丹参在全球范围内的存在概率,利用ArcGIS 10.3软件处理得到丹参全球范围内的潜在生态适宜产区。MaxEnt 3.3.3软件由其网站下载(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/>); ArcGIS 10.3软件由美国ESRI公司提供。具体操作方法为:首先,将丹参分布样点数据和环境因子数据进行格式转换,然后导入MaxEnt 3.3.3软件中,运行参数设置为随机选取25%的分布点作为测试集(Test data),剩余的样点数据作为训练集(Training data)进行模型准确性分析,最大迭代次数为500^[6]。

刀切法(Jackknife)是一种评估模型可靠性的分析方法,因此本研究采用刀切法中的ROC曲线(Receiver operating characteristic curve)来评价预测模型的准确度^[19]。ROC曲线是目前物种潜在分布预测模型评价中应用较为广泛的模型^[20]。ROC曲线下面积(Area under curve, AUC)数值范围一般为0.5~1.0,其值越大表示预测越精确,通常数值在0.8~0.9为好,0.9~1.0为非常好^[21]。

通常进行生态适宜产区划分的方式有很多种,本研究根据丹参生长的存在概率,以划分效果较好的人工分级方法为基础,将丹参生态适宜产区划分为3级,分别为

高适生区(存在概率为0.6~1)、中适生区(存在概率为0.4~<0.6)及不宜适生区(存在概率为0~<0.4)^[22]。

采用刀切法在MaxEnt 3.3.3软件中生成气候因子响应图,本研究设定存在概率大于0.5的结果数值为物种最适宜的生态因子范围^[23]。

2 结果

2.1 影响丹参生长的生态因子及ROC曲线

基于丹参在全球分布区的697个样点,经过MaxEnt模型分析得到丹参各生态因子统计参数,详见表1。由表1可知,丹参分布地区的最冷季均温数值变异范围较大,其次是年均降水量,而最热季均温和年均日照数值变异范围较小。本研究得到的ROC训练集及测试集的AUC值均为0.979(如图2所示),说明模型的预测效果达到了极好的测试水平,因此通过该模型预测得到的丹参生态适宜产区具有较高的准确性和可信度。刀切法分析表明,最热季均温的贡献度最大(为34.47%),其次是最冷季均温(为31.14%),另外年均降水量及年均日照的累积贡献度约为31.33%,以这4个指标绘制生态因子响应图,详见图3。由图3可知,存在概率大于0.5的适宜指标结果为:最适宜丹参生长的地区最热季均温范围为22.5~27.5℃,最冷季均温范围为-12~8℃,年均降水量范围为700~1 800 mm,年均日照范围为130~160 W/m²。

表1 丹参各生态因子统计参数(n=697)

Tab 1 Ecological factor statistical parameters of *S. miltiorrhiza* (n=697)

主要生态因子	适宜范围	变异系数(CV)	贡献度, %
年均温,℃	-3.09~19.62	0.19	0.33
最热季均温,℃	15.94~28.58	0.09	34.47
最冷季均温,℃	-11.22~10.28	1.27	31.14
年均降水量,mm	370.00~1 900.00	0.32	14.43
年均日照,W/m ²	117.82~159.22	0.09	16.90
年均相对湿度, %	40.52~120.25	0.23	2.73

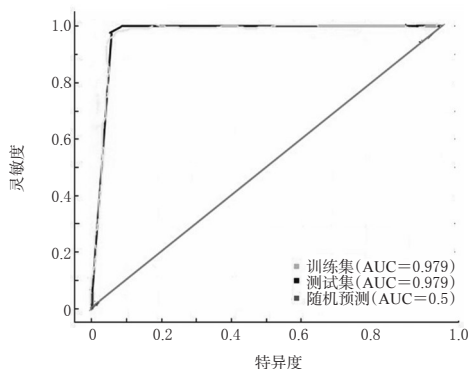


图2 丹参分布预测的ROC曲线

Fig 2 ROC curve of *S. miltiorrhiza* distribution prediction

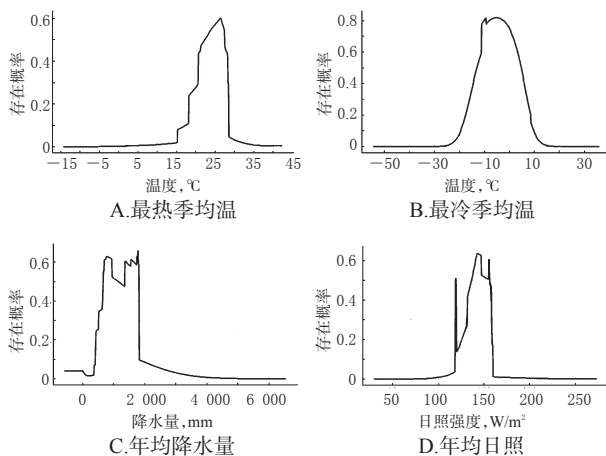


图3 影响丹参生长的4种主要生态因子响应图

Fig 3 Response diagrams of 4 main ecological factors which influence the growth of *S. miltiorrhiza*

2.2 丹参全球潜在生态适宜产区

由上文分析可得丹参全球潜在生态适宜产区,详见图4。由图4可知,丹参全球潜在生态适宜产区主要包括亚洲东部、欧洲南部、北美洲中东部以及非洲东北部地区,其全球潜在生态适宜产区面积约为79.16×10⁵ km²,其中高适生区主要分布在中国东部、美国中东部地区。适宜丹参种植的国家主要有中国、美国、俄罗斯、日本、韩国、朝鲜、哈萨克斯坦等,其中美国适宜产区面积为30.53×10⁵ km²,中国适宜产区面积为27.11×10⁵ km²,俄罗斯适宜产区面积为4.45×10⁵ km²。

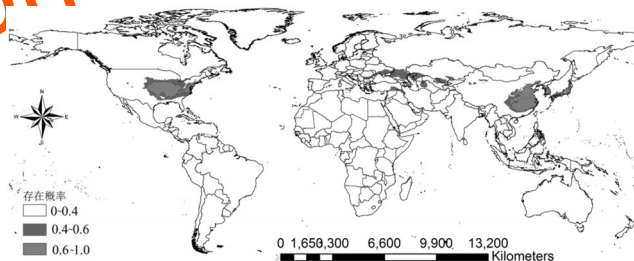


图4 丹参全球潜在生态适宜产区分布

Fig 4 Potential ecological suitable areas of *S. miltiorrhiza*

2.3 丹参在我国的潜在生态适宜产区

利用ArcGIS 10.3软件将MaxEnt 3.3.3软件运行的结果与我国省级行政分区图叠加,得到丹参在我国的潜在生态适宜产区及各省适宜种植面积。结果,丹参潜在生态适宜产区主要分布于华北平原、长江中下游平原以及新疆、辽宁的部分地区;其中,湖南、湖北、河南、江西、山东、四川、安徽、陕西、河北等省的适宜种植面积均超过1.50×10⁵ km²。

3 讨论

丹参作为根茎类药材,存在较为严重的连作障碍问题,重茬种植丹参易导致其抗逆性(抗旱、涝、虫病)下降、产量减少、外观粗糙、须根增多等问题;随着种植年限增加,容易导致死苗、根腐烂、产生大量寄生线虫等问题^[12]。开展丹参生态适宜产区预测,可有效指导丹参科学选地及生产高品质药材。通过物种生态预测模型可有效预测物种的生态适宜产区,其中MaxEnt模型因其设置的环境约束条件,使其预测结果相对保守,但准确性较高,预测面积适中,应用较为广泛^[24],因此本研究采用MaxEnt模型对丹参生态适宜产区进行预测。结果表明,该模型训练集和测试集的AUC值均大于0.9,说明模型预测结果准确度较高,适用于丹参药材生态适宜产区的预测分析。另外,该模型预测的适宜产区基本包括了目前我国已有的丹参种植产区,如陕西商洛、河南方城、四川中江、辽宁凌源、河北抚宁、山东平邑、江苏南京等地^[13,25-26],进一步验证了本研究MaxEnt模型预测的准确性。

本研究结果表明,丹参潜在生态适宜产区主要分布在亚洲东部和北美洲中东部地区,全球范围内丹参生态相似度最高的地区主要集中在中国、美国、俄罗斯、日本、韩国、朝鲜等地。我国的丹参潜在生态适宜产区主要包括湖南、湖北、河南、江西、山东、四川、安徽、陕西、河北等地,另外浙江、贵州等地也适宜引种丹参进行栽培。杨先富等^[27]研究表明,在贵州地区引种的丹参药材质量在10~11月份品质较好,各丹参酮成分含量较高,均高于2015年版《中国药典》规定,这也说明了本研究预测产区的准确性。魏志华等^[28]采用中药材产地适宜性分析地理信息系统(TCMGIS)对裕丹参在我国的生态适宜产区进行了区划,结果表明,裕丹参除河南外,在四川、陕西、湖北等地均可生长。何淑婷等^[25]采用MaxEnt模型对南丹参在我国的潜在分布区进行了预测,结果表明南丹参适宜生长的地区包括湖南、江西、浙江和福建等地。景鹏飞^[26]采用MaxEnt模型研究表明,我国丹参的生态适宜分布区主要在华北地区。本研究预测得到的我国丹参生态适宜产区基本包含了前人的预测地区,且预测所得全球生态适宜产区面积更大、覆盖范围更广,对未来丹参引种及科学种植具有一定参考价值。

中药材产量及有效成分与其生长环境生态因子密切相关^[29]。谢彩香等^[30]研究表明,适当低温处理有利于人参皂苷成分的快速积累。本研究结果表明,影响丹参

分布的主要生态因子有最热季均温、最冷季均温、年均降水量和年均日照。其中,最热季均温的贡献率高达34.47%,其次是最冷季均温(31.14%),由此表明这两个因子是影响丹参生长最重要的生态因子。由我国的丹参潜在生态适宜产区图可以看出,丹参适宜生长在温带地区,在我国最北端的适宜产区以北京和河北周边地区为界限,这说明气温对丹参的分布影响较大。张辰露等^[31]研究表明,在温暖湿润、昼夜温差相对小的地区,丹参中丹参酮类成分的含量较高,而随着纬度及海拔升高,其含量逐渐降低。这与本研究得出的影响丹参的主要生态因子为气温的结论相符。因此,高海拔及高纬度地区不适宜丹参栽培,在引种过程中需要注意种植基地的选择及种植温度的调控。

综上所述,本研究预测的丹参潜在生态适宜产区可为未来丹参药材引种和栽培提供科学参考。但由于影响丹参生长的环境因素众多,本研究预测的部分产区实际可能不适宜丹参生长,因此需要先进行小范围栽培试验,成功后方可大规模推广种植。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 2015年版. 北京:中国医药科技出版社,2015:76-77.
- [2] 柴瑞震. 丹参的药理研究近况[J]. 中国中医药科技,2003,(06):390-391.
- [3] 李耿,孟繁蕴,杨洪军,等. UPLC法同时测定丹参中11种成分的含量[J]. 中国药房,2014,25(19):1766-1768.
- [4] 张辰露,孙群,叶青. 连作对丹参生长的障碍效应[J]. 西北植物学报,2005,25(5):1029-1034.
- [5] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性,2013,21(1):90-98.
- [6] ZHANG Q, WEN J, CHANG ZQ, et al. Evaluation and prediction of ecological suitability of medicinal plant American Ginseng (*Panax quinquefolius*) [J]. *Chin Herb Med*, 2018, 10(1):80-85.
- [7] RAY D, BEHERA MD, JACOB J. Evaluating ecological niche models: a comparison between Maxent and GARP for predicting distribution of *Hevea brasiliensis* in India [J]. *Proc Natl Acad Sci, India Sect B*, 2017, 14(3):1-7.
- [8] DU Z, WU J, MENG X, et al. Predicting the global potential distribution of four endangered *Panax* species in middle-and low-latitude regions of China by the Geographic Information System for Global Medicinal Plants (GMP-

- GIS)[J]. *Molecules*, 2017, 22(10):e1630.
- [9] PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190(3/4):231-259.
- [10] 陈士林. 中国药材产地生态适宜性区划[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017: 14.
- [11] 沈亮, 吴杰, 李西文. 北细辛全球产地生态适宜性分析及品质生态学研究[J]. 世界科学技术(中医药现代化), 2016, 18(8):1295-1302.
- [12] 赵魁, 郭晓恒, 宋杰, 等. 全国丹参生产现状的调查和分析[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(9):2307-2310.
- [13] 王志芬, 刘喜民. 山东省丹参药材产业现状与发展策略[J]. 山东农业科学, 2012, 44(8):131-132, 136.
- [14] KRITICOS DJ, WEBBER BL, LERICHE A, et al. Climod: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling[J]. *Methods Ecol Evol*, 2012, 3(1):53-64.
- [15] GRAHAM MH. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression[J]. *Ecology*, 2003, 84(11):2809-2815.
- [16] ZHANG MG, SLIK JWF, MA KP. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China[J]. *Sci Rep*, 2016. DOI:org.10.1038/srep22400
- [17] 沈亮, 吴杰, 李西文, 等. 人参全球产地生态适宜性分析及农田栽培选地规范[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(18):3314-3322.
- [18] 孟祥霄, 黄林芳, 董林林, 等. 三七全球产地生态适宜性及品质生态学研究[J]. 药学学报, 2016, 51(9):1483-1493.
- [19] DORFMAN DD, BERBAUM KS, METZ CE. Receiver operating characteristic rating analysis: generalization to the population of readers and patients with the Jackknife method[J]. *Invest Radiol*, 1992, 27(9):723-731.
- [20] PETERSON AT, MONICA P, EATON M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt[J]. *Ecography*, 2007, 30(4):550-560.
- [21] SWETS JA. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. *Science*, 1988, 240(4857):1285-1293.
- [22] YANG XQ, KUSHWAHA SPS, SARAN S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills[J]. *Ecol Eng*, 2013, 51(1):83-87.
- [23] HEMERY LG, MARION SR, ROMSOS CG, et al. Hinkel ecological niche and species distribution modelling of sea stars along the Pacific Northwest continental shelf[J]. *Divers Distrib*, 2016, 22(12):1314-1327.
- [24] 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):66-74.
- [25] 何淑婷, 白碧玉, 但佳惠, 等. 基于MaxEnt的南丹参在中国的潜在分布区预测及适生性分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(8):2311-2314.
- [26] 景鹏飞. 丹参组药用植物资源调查和多样性评价研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [27] 杨先富, 徐文静, 简卫光, 等. 贵州引种丹参质量动态变化研究[J]. 中国现代中药, 2018, 20(3):301-304.
- [28] 魏志华, 王新民, 乔卿梅, 等. 裕丹参药材适宜产区区划研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(17):24-25.
- [29] 王欢, 李慧, 曾凡琳, 等. 黄花蒿空间分布及全球潜在气候适宜区[J]. 中药材, 2015, 38(3):460-466.
- [30] 谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等. 人参皂苷与生态因子的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31(24):7551-7563.
- [31] 张辰露, 梁宗锁, 郭宏波, 等. 不同气候区丹参生物量、有效成分变化与气象因子的相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(4):607-613.

(收稿日期:2018-02-24 修回日期:2018-07-02)

(编辑:孙冰)