

地理环境因子对黄花蒿中青蒿酸含量空间分布影响的探测分析

史婷婷, 张小波, 郭兰萍, 王慧, 景志贤, 黄璐琦*

(中国中医科学院 中药资源中心 道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700)

[摘要] 道地药材指经过中医临床长期应用优选出来的, 产在特定地域, 受到特定生产加工方式影响, 较其他地区所产同种药材品质佳、疗效好且质量稳定, 具有较高的知名度的药材。道地药材是我国几千年悠久文明史、中医中药发展史形成的特有概念。根据道地药材的定义, 可以看出不同地域之间的同种药材在质量和疗效等方面存在一定的差异性, 在特定区域还存在一定的相似性。该文基于采样点的青蒿酸含量及其各种潜在的地理环境因子, 应用地理探测器模型, 分析了地理环境因子对中国各地黄花蒿中青蒿酸含量空间分布的影响。研究发现: 青蒿酸含量的空间分布是多种因素综合作用的结果, 各环境因子对青蒿酸含量的空间分布的影响依次为土壤类型(0.233) > 年均辐射量(0.208) > 植被类型(0.192) > 高程(0.171) > 日照(0.170) > 年均气温(0.153) > 年均降水量(0.111) > 坡度(0.110) > 相对湿度。其中, 土壤类型和年均辐射量是探测到的主要影响因素, 且主要影响区域在土壤类型为初育土, 年均辐射量为 1 200 ~ 1 400 kWh · m⁻² 的分区。该研究筛选出的地理环境主导因子可用于遥感技术监测青蒿酸的空间分布区域, 从而为黄花蒿的种植等提供理论依据。

[关键词] 黄花蒿; 青蒿酸; 空间分异; 地理探测器; 地理环境因子

Detection and analysis of effect of geographical environmental factors on spatial distribution of artemisinic acid in *Artemisia annua*

SHI Ting-ting, ZHANG Xiao-bo, GUO Lan-ping, WANG Hui, JING Zhi-xian, HUANG Lu-qi*

(State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

[Abstract] Dao-di herbs are preferred by long-term clinical application of Chinese medicine, they are produced in a specific area and affected by the specific production and processing methods. Dao-di herbs have a high reputation, compared with other regions produced by the same kind of herbs with good quality, good efficacy and stable quality characteristics. Geo-herbal is a unique concept that has been formed by the history of Chinese civilization for thousands of years and the history of Chinese medicine. According to the definition of geo-herbal, it can be seen that there are some differences in the quality and efficacy of the same kind of medicinal herbs in different regions, and there is some similarity in the specific area. In this study, based on the content of artemisinic acid in sampling points and its potential environmental factors, the effects of geographical environment factors on the spatial distribution of artemisinic acid content in *Artemisia annua* were studied by using the geophysical model. The results show that the spatial distribution of artemisinic acid content is the result of a combination of multiple factors. The effects of environmental factors on the spatial distribution of artemisinic acid were in the order of soil type (0.233) > radiation (0.208) > vegetation type (0.192) > elevation (0.171) > sunshine (0.170) > annual mean temperature (0.153) > annual precipitation (0.111) > slope (0.110) > relative humidity. Among them, the soil type and the amount of radiation are the main influencing factors, and the main influencing area is in the soil type as the initial soil and the average annual radiation of 1 200-1 400 kWh · m⁻². The main influencing factors selected in this study can be used to mo-

[收稿日期] 2017-10-12

[基金项目] 中央本级重大增减支项目(2060302); 科技基础性工作专项(2013FY114500); 中医药全国性专项(ZZYK2013-科技司 A-004)

[通信作者] * 黄璐琦, E-mail: huangluqi01@126.com

[作者简介] 史婷婷, 博士, 研究方向为中药资源遥感信息提取, E-mail: shi_ting@163.com

• 4282 •

monitor the spatial distribution of artemisinic acid by remote sensing technology, so as to provide the theoretical basis for the cultivation of *A. annua*.

[Key words] *Artemisia annua*; artemisinic acid; spatial differentiation; geographic detectors; influencing factors

青蒿酸(artemisinic acid)是一种倍半萜类化合物^[1-2],为青蒿素及其衍生物合成代谢的重要前体化合物^[3-5],具有抗疟疾、抗肿瘤、调控脂肪细胞分化等重要的药用价值^[6-8]。近年来研究发现青蒿酸在黄花蒿 *Artemisia annua* 植物体中含量较高,而黄花蒿植物在我国具有明显资源优势^[9-10]。

青蒿酸在植物中含量受各种地理环境因子的影响^[9],张东等^[11]对湖南、重庆以及山西 3 省 10 个地区青蒿酸含量分析表明,湖南 5 个样品青蒿酸质量分数为 0% ~ 0.4%,重庆酉阳为 0.023%,山西青蒿酸含量最高 3 个样品质量分数为 0.123% ~ 0.4%。孙景灿等^[12]研究表明,湖南青蒿植物青蒿酸的质量分数 0.7 ~ 1.4 mg · g⁻¹,重庆植物青蒿酸质量分数 0.2 mg · g⁻¹,贵州植物青蒿酸质量分数 1.1 mg · g⁻¹。由此可见,青蒿酸在不同地区的含量有较大差异。

地理探测器模型能够客观反映地理要素对自然综合体的影响力及度量空间异质性,已在景观生态、健康风险、社会、土地等方面^[13-16]的影响因素及机制研究中得到应用且取得了良好的效果。考虑到青蒿酸含量空间分布的核心是空间分异性即同级区域内要素差异性最小、不同区域之间要素差异性最大,正与地理探测器模型能够充分表征的空间异质性功能相吻合。为了分析中国黄花蒿中青蒿酸含量空间分布的特征及其形成机制,本研究尝试利用地理探测器进行探测分析。故本研究基于文献和实地调查结果,运用地理探测器方法,对中国各省黄花蒿中青蒿酸含量空间分布的影响机制进行研究,分析地理环境因子对中国黄花蒿中青蒿酸含量空间分布的影响和指示作用,为我国黄花蒿种植及与青蒿产业发展相关的政策规划制定提供参考依据。

1 数据来源

在全国 19 个省份选择 502 个采样点采集样品,测定青蒿酸含量。采样过程中用 GPS 测定采样点的经度、纬度等位置信息。

2 方法

地理探测器是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰空间分析小组开发的分析地理空间影响

因素对人类健康影响机制的一种方法^[17]。该方法假设地理事物总是存在于特定的空间位置,影响其变化的环境因子在空间上具有差异性,若某环境因子与地理事物的变化在空间上具有显著一致性,则该环境因子对地理事物的发生与发展具有决定意义。地理探测器包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 个部分内容。

风险探测着重揭示哪些因子的类型分区是青蒿酸含量显著的高值或低值,通过 *t* 检验来度量。

$$t_{ij} = \frac{R_{h=i} - R_{h=j}}{\sqrt{\sigma_{h=i}^2/n_{h=i} - \sigma_{h=j}^2/n_{h=j}}} \quad (1)$$

式中: t_{ij} 为 *t* 检验值, $R_{h=i}$, $R_{h=j}$ 分别为子区域 *h* 内属性 *i* 和 *j* 的青蒿酸含量均值, $\sigma_{h=i}^2$, $\sigma_{h=j}^2$ 分别是子区域 *h* 内属性 *i* 和 *j* 的青蒿酸含量方差, $n_{h=i}$, $n_{h=j}$ 为子区域 *h* 内 2 个属性的样本量。

因子解释力主要识别某种环境因子是否为形成青蒿酸含量空间分布格局的主导因素。

$$P_{D,H} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中 $P_{D,H}$ 为影响因子 *D* 对青蒿酸含量的解释力, N , σ^2 分别为样本量和方差, N_h , σ_h^2 为 *h* ($h = 1, 2, \dots, L$) 层样本量和方差。 $P_{D,H}$ 取值范围为 [0, 1], 数值越大表明分类因子对青蒿酸含量的解释力越强, 数值为 0 说明分类因子对青蒿酸含量完全无关, 数值为 1 说明分类因子可以完全解释青蒿酸含量分布差异。

生态探测主要探究不同环境因子在影响青蒿酸含量空间分布方面的作用是否有显著的差异,通过 *F* 检验来度量。

$$F = \frac{n_{C,p}(n_{C,p} - 1) \sigma_{C,p}^2}{n_{D,p}(n_{D,p} - 1) \sigma_{D,p}^2} \quad (3)$$

式中 F 为 *F* 检验值, $n_{C,p}$ 和 $n_{D,p}$ 分别为单元 *p* 内影响因子 *C* 和 *D* 的样本量, $\sigma_{C,p}^2$ 和 $\sigma_{D,p}^2$ 分别为影响因子 *C* 和 *D* 的方差, 统计表达式服从 $F(n_{C,p} - 1, n_{D,p} - 1)$ 和 $df(n_{C,p}, n_{D,p})$ 分布。模型零假设为 H_0 , $\sigma_{C,p}^2 = \sigma_{D,p}^2$, 如果拒绝模型初始假设, 且达到 0.05 显著性水平, 说明影响因子 *C* 对青蒿酸含量的控制作用显著大于影响因子 *D*。

交互探测可以解释影响青蒿酸含量空间分布的环境因子两两之间是否具有交互作用,由以下表达式构成:若 $P(x \cap y) < \min [P(x), P(y)]$,说明因子 x 和 y 交互后非线性减弱;若 $\min [P(x), P(y)] < P(x \cap y) < \max [P(x), P(y)]$,说明因子 x 和 y 交互后单线性减弱;若 $P(x \cap y) > \max [P(x), P(y)]$,说明因子 x 和 y 交互后双因子增强;若 $P(x \cap y) > P(x) + P(y)$,说明因子 x 和 y 交互后非线性增强;若 $P(x \cap y) = P(x) + P(y)$,说明因子 x 和 y 相互独立。

3 结果与分析

3.1 风险探测 为了确定地理环境因子对黄花蒿中青蒿酸含量的具体影响,本研究选择9个因子开展风险探测分析,分别为高程、坡度、年均降水量、年均气温、年均相对湿度、年均日照、年均辐射量、土壤类型、植被类型。以高程数据为例,比较不同高程分区之间青蒿酸含量的差异性情况,见表1。编号1~6代表不同的高程分区,1代表高程(h) < 500 m,2代表 $500 \text{ m} \leq h < 1\,000$ m,3代表 $1\,000 \text{ m} \leq h < 2\,000$ m,4代表 $2\,000 \text{ m} \leq h < 3\,000$ m,5代表 $3\,000 \text{ m} \leq h < 4\,000$ m,6代表 $4\,000 \text{ m} \leq h < 5\,000$ m。结果表明,当将高程按照以上数值进行分级时,各高程分区之间的青蒿酸含量的统计显著差异性结果为最佳。

表1 不同高程分区之间青蒿酸含量差异性的统计显著性
Table 1 Statistically significant difference of the average content of artemisinic acid between different elevation zones

项目	1	2	3	4	5	6
1						
2	Y					
3	Y	N				
4	Y	Y	Y			
5	Y	Y	Y	Y		
6	Y	Y	Y	Y	Y	

注:表头数字为不同高程分区代码(表2同);Y,2个高程分区之间青蒿酸含量在95%的程度上差异显著;N,不显著。

如同高程的风险分析,对其他因子做类似分析,按照先验知识或者最优分类方法(如自然间断法)进行分级。经风险探测器探测,结果表明当坡度分为5级($0 \sim 2^\circ$, $2 \sim 6^\circ$, $6 \sim 15^\circ$, $15 \sim 25^\circ$, $> 25^\circ$),年均降水量分为5级(< 200 mm, $200 \sim 600$ mm, $600 \sim 1\,000$ mm, $1\,000 \sim 1\,500$ mm, $> 1\,500$ mm),年均气

温分为5级($< 2^\circ$, $2 \sim 7^\circ$, $7 \sim 15^\circ$, $15 \sim 18^\circ$, $> 18^\circ$),年均相对湿度分为6级($< 30\%$, $30\% \sim 40\%$, $40\% \sim 50\%$, $50\% \sim 60\%$, $60\% \sim 80\%$, $> 80\%$),年均日照分为5级($< 1\,000$ h, $1\,000 \sim 1\,400$ h, $1\,400 \sim 2\,200$ h, $2\,200 \sim 2\,500$ h, $> 2\,500$ h),年均辐射量分为4级($< 1\,200$ kWh \cdot m $^{-2}$, $1\,200 \sim 1\,400$ kWh \cdot m $^{-2}$, $1\,400 \sim 1\,600$ kWh \cdot m $^{-2}$, $> 1\,600$ kWh \cdot m $^{-2}$),土壤类型分为13级(淋溶土、半淋溶土、铁铝土、灰化土、钙积土、荒漠土、初育土、变性土、盐碱土、薄层土、红砂土、人为土、其他),植被类型分为11级(针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原植被、草丛、沼泽、高山植被、栽培植被、其他)时,因子的统计显著差异性为最佳。

风险探测结果同时还表明不同高程分区内的平均青蒿酸含量大小依次为1(0.061) $>$ 3(0.025) $>$ 2(0.019) $>$ 6(0.008) $>$ 5(0.005) $>$ 4(0.002)。结合上述分级可知,高程小于500 m的区域的平均青蒿酸含量呈现显著高值,而高程在2 000 ~ 3 000 m的区域的平均青蒿酸含量呈现显著低值。其他所有地理环境因子的风险探测结果见表2。

3.2 因子探测 利用地理探测器模型计算得出因子探测的结果,每个因子对青蒿酸含量的贡献量($P_{D,H}$)大小的排序依次为:土壤类型(0.233) $>$ 年均辐射量(0.208) $>$ 植被类型(0.192) $>$ 高程(0.171) $>$ 日照(0.170) $>$ 年均气温(0.153) $>$ 年均降水量(0.111) $>$ 坡度(0.110) $>$ 相对湿度(0.051)。结果表明,土壤类型的因子解释力最大,说明土壤类型对青蒿酸含量的空间分布具有主导作用,即土壤类型因子和青蒿酸含量空间分布之间具有最强的一致性。年均辐射量为次要影响因素,说明年均辐射量因子也是影响青蒿酸空间分布的重要因素。

3.3 生态探测 生态探测反映各地理环境因子对青蒿酸含量的影响是否具有显著差异见表3。土壤类型和年均辐射量之间对青蒿酸含量的影响没有显著差异;土壤类型与相对湿度、年均降水量、坡度中任何一个因子对青蒿酸含量的影响都具有显著差异;年均辐射量与土壤类型具有类似的特征;而相对湿度、年均降水量、坡度两两之间对青蒿酸含量的影响没有显著差异。从聚类的角度看,可将土壤类型和年均辐射量划分为对青蒿酸含量的影响显著的一类,而将相对湿度、年均降水量、坡度划分为对青蒿

表2 各环境因子风险探测

Table 2 The risk detection results of various environmental factor

%

环境因子	青蒿酸												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
坡度	0.055	0.022	0.010	0.003									
年均降水量	0.012	0.026	0.068	0.037	0.014								
年均气温	0.009	0.014	0.063	0.037	0.013								
年均相对湿度			0.036	0.025	0.047	0.012							
年均日照	0.015	0.012	0.063	0.017	0.047								
年均辐射	0.012	0.066	0.014	0.047									
土壤类型	0.029	0.053	0.019		0.017	0.003	0.095		0.019	0.009	0.007	0.040	0.053
植被类型	0.014		0.046	0.102	0.012	0.033	0.018	0.018	0.029	0.006	0.155		

酸含量的影响不大的一类,结合因子探测的结果,可以看出,土壤类型和年均辐射量对青蒿酸含量的影响相对较大,其余因子的影响相对较小。结合风险

因子探测结果可知,对青蒿酸含量空间分布影响较大的土壤类型的适宜类型为初育土,年均年均辐射量的适宜类型为 $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表3 不同环境因子对青蒿酸含量影响的统计显著性差异

Table 3 Statistically significant difference of the impacts for different environmental factors on the content of artemisinic acid

环境因子	高程	相对湿度	日照	年均气温	年均降水量	年均辐射量	坡度	植被类型	土壤类型
高程									
相对湿度	N								
日照	N	Y							
年均气温	N	N	N						
年均降水量	N	N	N	N					
年均辐射量	N	Y	N	N	Y				
坡度	N	N	N	N	N	Y			
植被类型	N	Y	N	N	N	N	N		
土壤类型	N	Y	N	N	Y	N	Y	N	

注: Y. 两环境因子之间有显著差异,并通过 0.05 水平显著性检验; N. 两环境因子之间差异不显著。

3.4 交互探测 交互探测主要分析环境因子对青蒿酸含量空间分布的影响是否存在交互作用,若存在交互作用,作用是增强还是减弱见表 4。相对湿度与年均气温、相对湿度与年均降水量、年均辐射量与年均气温、年均辐射量与年均降水

量、土壤类型与年均降水量、土壤类型与植被类型之间分别为非线性增强;而其余因子之间为相互增强。总体来说,任意 2 个环境因子之间的交互作用都明显大于各单个因子对青蒿酸含量空间分布的影响。

表4 2种环境因子(PD值)对青蒿酸含量影响的交互作用

Table 4 Interactive impact of each paired factors on the content of artemisinic acid

环境因子	高程	相对湿度	日照	年均气温	年均降水量	年均辐射量	坡度	植被类型	土壤类型
高程									
相对湿度	0.194								
日照	0.289	0.194							
年均气温	0.305	0.207	0.318						
年均降水量	0.249	0.175	0.235	0.213					
年均辐射量	0.292	0.217	0.242	0.410	0.362				
坡度	0.200	0.134	0.223	0.219	0.199	0.241			
植被类型	0.287	0.235	0.293	0.290	0.289	0.345	0.342		
土壤类型	0.337	0.268	0.352	0.369	0.360	0.346	0.284	0.359	

研究表明,青蒿酸含量的空间分布是多种因素综合作用的结果,其中,土壤类型和年均辐射量是探测到的主要影响因素,且主要影响区域在土壤类型为初育土,年均辐射量为 $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 的分区内。

4 结论与讨论

我国各地黄花蒿中青蒿酸含量差异较大,通过对各地青蒿酸含量空间分布的影响机制分析,结果表明:①在所有环境因子中,土壤类型、年均辐射量对青蒿酸含量空间分布的解释力较强,是青蒿酸含量空间分布的主要影响因素。②不同影响因子的各个类型分区的平均青蒿酸含量存在统计差异。③生态探测器结果显示土壤类型和年均辐射量为对青蒿酸含量的影响显著的一类。结合因子探测和风险探测的结果表明,土壤类型和年均辐射量对青蒿酸含量的影响相对较大,其余因子的影响相对较小。同时,对青蒿酸含量空间分布影响较大的土壤类型的适宜类型为初育土,年均辐射量的适宜类型为 $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 。④相对单个因子来说,任意2个环境因子的交互作用都能够增强对青蒿酸含量空间分布的影响。

[致谢] 中国中医科学院邵爱娟研究员,张东助理研究员在实验过程中给予的帮助。

[参考文献]

- [1] 邓定安,朱大元,高耀良,等. 青蒿酸(artemisinic acid)的结构研究[J]. 科学通报,1981,26(19):1209.
- [2] 屠呦呦,朱启聪,沈星. 中药青蒿幼株的化学成分研究[J]. 中国中药杂志,1985,10(9):35.
- [3] 汪猷,夏志强,周凤仪,等. 青蒿素生物合成的研究Ⅲ. 青蒿素和青蒿素B生物合成中的关键性中间体——青蒿酸[J]. 化学学报,1988,46(1988):1152.
- [4] Abidin M Z, Israr M, Rehman R U, et al. Artemisinin, a novel antimalarial drug: biochemical and molecular approaches for en-

hanced production [J]. *Planta Med*, 2003, 69(4): 289.

- [5] 邓思娟,李春远,陈实,等. 青蒿化感物质的分离与结构鉴定[J]. 华南农业大学学报,2008,29(3):42.
- [6] 邓定安,蔡俊超. 具有抗肿瘤活性的青蒿酸衍生物[J]. 有机化学,1991,11(5):540.
- [7] Lee J, Kim M H, Lee J H, et al. Artemisinic acid is a regulator of adipocyte differentiation and C/EBP δ expression [J]. *J Cell Biochem*, 2012, 113(7): 2488.
- [8] 孙玮辰,韩家娴. 四种青蒿酸及青蒿B衍生物的体外抗癌作用[J]. 中国药理学报,1992,13(6):541.
- [9] 张雪,李隆云,杨究,等. 不同产地的青蒿药用成分含量研究[J]. 中国药房,2009(15):1188.
- [10] 周英平,赵敏,周志强. 黄花蒿资源的研究进展[J]. 国土与自然资源研究,2006(3):93.
- [11] 张东,杨岚,杨立新,等. HPLC-UV-ELSD法同时测定青蒿中青蒿素,青蒿乙素和青蒿酸的含量[J]. 药学学报,2007,42(9):978.
- [12] 孙景灿,曾建立,赵兵,等. 反相高效液相色谱法测定青蒿中青蒿酸的含量[J]. 天然产物研究与开发 2010(5):846.
- [13] Liang P, Yang X. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors [J]. *Catena*, 2016, 145: 321.
- [14] Hu Y, Xia C, Li S, et al. Assessing environmental factors associated with regional schistosomiasis prevalence in Anhui province, Peoples' Republic of China using a geographical detector method [J]. *Infect Dis Poverty*, 2017, 6(1): 87.
- [15] 湛东升,张文忠,余建辉,等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展,2015,34(8):966.
- [16] 魏凤娟,李江风,刘艳中. 湖北县域土地整治新增耕地的时空特征及其影响因素分析[J]. 农业工程学报,2014,30(14):267.
- [17] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *Int J Geogr Inf Sci*, 2010, 24(1): 107.

[责任编辑 吕冬梅]