

· 研究报告 ·

基于五味子甲素与乙素的秦岭地区野生华中五味子的潜在空间分布

郭彦龙^{1,2}, 顾蔚^{1,3*}, 路春燕^{1,2}, 卫海燕^{2*}

¹陕西师范大学, 西北濒危药材资源开发国家工程实验室, 西安 710062; ²陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062

³陕西师范大学生命科学院, 西安 710062

摘要 华中五味子(*Schisandra sphenanthera*)为我国三级保护野生药材物种, 在秦岭地区分布较广。采集秦岭地区19个样地307个采样点的华中五味子样本, 使用HPLC方法检测果实中五味子甲素和乙素含量, 基于模糊数学原理建立其与气候、土壤和地形三大类15个评价因子之间的隶属函数, 利用最大信息熵模型确定各评价指标权重, 使用加权平均法并参照GIS空间分析确定基于五味子甲素和乙素的秦岭地区野生华中五味子的潜在空间分布。研究结果显示, 秦岭地区华中五味子不适宜生境面积占研究区总面积的11.40%; 适宜生境面积占50.63%; 高适宜生境面积占37.97%, 主要集中在陕西南部、甘肃东部、河南西部、湖北神农架林区及其周边海拔800–2 000 m的山区。研究表明, 基于GIS与模糊数学构建的生境适宜性评价模型可以准确地对秦岭地区华中五味子生境适宜性作出科学且综合性评价, 并可量化适宜生境面积和空间分布, 为华中五味子野生抚育GAP基地选址和建设提供数据支撑, 为保护和可持续利用华中五味子野生资源提供参考。

关键词 华中五味子, GIS, 隶属函数, 生境适宜性, 秦岭

郭彦龙, 顾蔚, 路春燕, 卫海燕 (2013). 基于五味子甲素与乙素的秦岭地区野生华中五味子的潜在空间分布. 植物学报 48, 411–422.

华中五味子(*Schisandra sphenanthera*)隶属五味子属(*Schisandra*), 为多年生落叶木质藤本, 其成熟干燥果实称为南五味子(国家药典委员会, 2010)。华中五味子主产于我国西南部至东部, 在秦岭地区分布较广(Smith, 1947; 中国科学院中国植物志编辑委员会, 1996; Saunders, 2000)。近年来, 由于华中五味子的药用价值日益受到重视, 市场需求量激增, 资源被过度开采, 加之人类活动使其产地生境退化, 致使野生资源量减少。华中五味子已被纳入《国家重点保护野生药材物种名录》, 属于三级保护野生药材物种。对华中五味子生境适宜性进行定性、定量和定位评价, 明确其生境适宜性特征与空间分布差异, 可为生境保护与管理提供参考, 同时也为华中五味子的野生抚育GAP(good agricultural practice)基地建设提供借鉴。对特定物种的生境适宜性评价及潜在分布区预测, 国内外已有许多研究。其中, 生境适宜性指数(habitat suitability index) (Dussault et al., 2006; Tian

et al., 2009)、广义相加模型(generalized additive model) (朱源和康慕谊, 2005)、Maxent模型(Phillips et al., 2006; 胡理乐等, 2012)、分类和回归树模型(classification and regression trees)(吴建国等, 2010)、生态位因子分析(ecological niche factor analysis)(Podchong et al., 2009)及Logistic回归模型(Singh and Kushwaha, 2011)等已被广泛应用。但这些模型均侧重于预测物种的分布, 不能对不同地理环境下目标物种的品质进行预测。本研究在秦岭地区采集华中五味子果实, 应用HPLC方法检测药用木脂素含量, 选取五味子甲素和五味子乙素作为指标, 结合地理信息系统(geo-information system, GIS)、最大信息熵模型(maximum entropy model)及Fuzzy隶属函数, 对秦岭地区华中五味子生境适宜性进行综合量化评价, 以期确定华中五味子适宜生境中生态地理因子的适宜范围, 量化适宜生境的面积和空间分布, 为保护和可持续利用华中五味子野生资源提供建议和

收稿日期: 2012-10-08; 接受日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(No.31070293)和国家“十一五”科技支撑计划(No.2006BAI06A13-06)

* 通讯作者。E-mail: weigu@snnu.edu.cn; weihy@snnu.edu.cn

参考, 并对没有明确生境标准的物种进行生境适宜性评价提供新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 材料来源与数据处理

依据秦岭地区相关研究(中国科学院中国自然地理编辑委员会, 1985; 康慕谊和朱源, 2007)及数字高程模型(digital elevation model, DEM)划定研究区(图1), 经度103°45′–113°45′E, 纬度30°30′–35°30′N, 自西向东横跨6个省(或直辖市)包括甘肃、四川、重庆、陕西、河南和湖北, 面积为 $2.38\times10^5\text{ km}^2$ 。2007–2011年, 本研究组在此区域设置了19个样地, 共收集了307个采样点的华中五味子(*Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils.)样本, 使用GPS(global positioning

system)记录经度、纬度和海拔, 测量坡度和坡向等信息。为防止无性繁殖的影响, 样本采集要求株间距离大于100 m。所选植株均生长正常, 无病虫害, 每个样地收集10–20个样本。取鲜果杀青后自然晾干, 置于干燥器中保存, 研磨成粉后用于检测木脂素的含量。

本研究使用的4个气候栅格数据(年极低温(TMIN)、年极高温(TMAX)、生长期均温(ATG)和生长期降水量(PG))由人地系统专题数据库(TDHES, <http://www.data.ac.cn>)提供。研究区年日照时数(SH)和年相对湿度(ARH)数据由中国气象数据共享服务系统(CMDSSS, <http://cdc.cma.gov.cn>)提供。该数据集包括分布在秦岭161个气象观测站30年观测的平均值。研究区地形数据(海拔(ASL)、坡度(SLOP)和坡向(ASPE))以及土壤数据(顶层土壤USDA分类、土壤pH

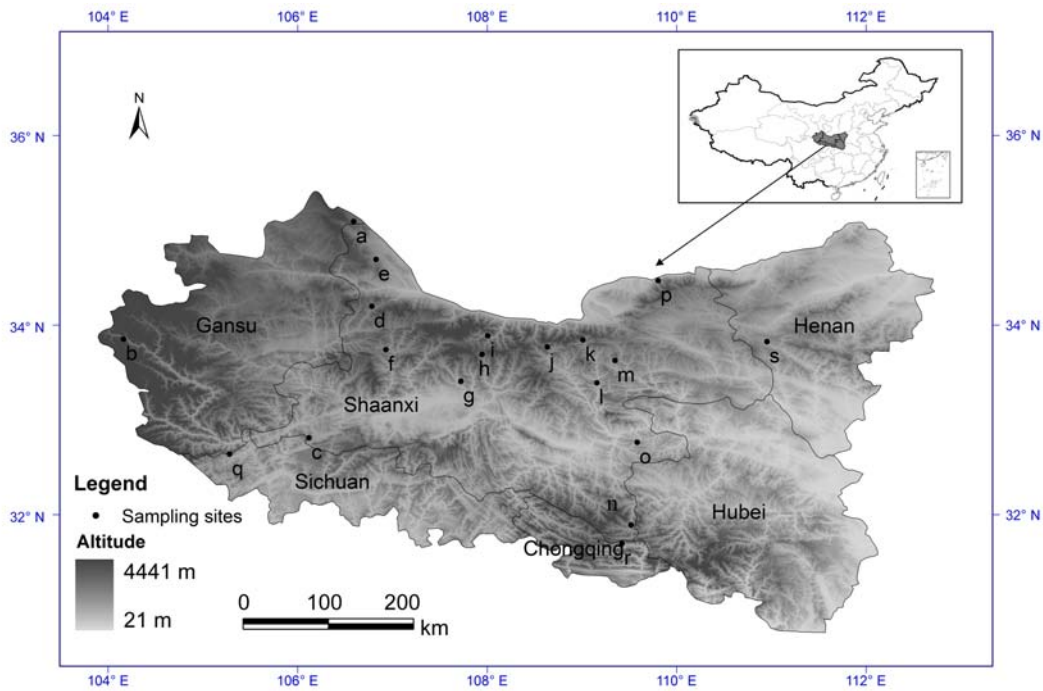


图1 研究区位置和采样点分布

a: 甘肃华亭; b: 甘肃舟曲; c: 陕西北强; d: 陕西凤县; e: 陕西陇县; f: 陕西留坝; g: 陕西茅坪; h: 陕西佛坪; i: 陕西太白; j: 陕西北宁; k: 陕西营盘; l: 陕西镇安; m: 陕西凤镇; n: 陕西镇坪; o: 陕西旬阳; p: 陕西华县; q: 四川青川; r: 重庆巫溪; s: 河南卢氏

Figure 1 Study area and sampling sites distribution

a: Huating, in Gansu; b: Zhouqu, in Gansu; c: Ningqiang, in Shaanxi; d: Fengxian, in Shaanxi; e: Longxian, in Shaanxi; f: Liuba, in Shaanxi; g: Maoping, in Shaanxi; h: Foping, in Shaanxi; i: Taibai, in Shaanxi; j: Ningshan, in Shaanxi; k: Yingpan, in Shaanxi; l: Zhen'an, in Shaanxi; m: Fengzhen, in Shaanxi; n: Zhenping, in Shaanxi; o: Xunyang, in Shaanxi; p: Huaxian, in Shaanxi; q: Qingchuan, in Sichuan; r: Wuxi, in Chongqing; s: Lushi, in Henan

值(PH)、全氮含量(TN)、全磷含量(TP)、全钾含量(TK)和有机碳含量(TOC))由中国科学院国际科学数据服务平台(ISDSP, <http://datamirror.csdb.cn>)提供。

1.2 研究方法

1.2.1 华中五味子果实木脂素含量测定

应用高效液相色谱法(high efficiency liquid chromatography, HPLC)检测华中五味子果实中木脂素的含量(Gu et al., 2008)。在307株果实样本中, 五味子甲素(deoxyschizandrin)的含量介于0–1.342%之间, 五味子乙素(γ -schizandrin)的含量为0.001%–2.262%。

1.2.2 空间数据预处理

区域生境适宜性指数的计算以栅格作为基本单元(Dussault et al., 2006; Tian et al., 2009), 计算前先使用GIS和数据库技术对收集的气象及土壤等数据进行空间栅格化。依据研究区域的空间大小和环境变异程度, 综合考虑计算效果及原始数据的精度, 设置栅格分辨率为1 km \times 1 km。土壤矢量数据利用ArcGIS 9.3软件转化成栅格数据, 气候及地形因子栅格数据使用ERDAS IMAGINE 9.2软件拼接, 再用ArcGIS 9.3软件裁剪。气象站点观测数据(年日照时数和年相对湿度)应用ArcGIS 9.3软件插值分析并转化成栅格数据。

1.2.3 评价指标体系构建

物种生境适宜性评价因子的选择是评价的关键(陈海生等, 2009; Podchong et al., 2009)。本研究组依据对华中五味子的野外调研及其生物学特性, 选择了6个气候因子、6个土壤因子和3个地形因子, 共计3大类15个评价因子(表1)。

1.2.4 评价模型

从收集到的307个采样点的华中五味子样本中随机选取75%作为建模数据, 25%作为检验数据。依据华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量与评价因子各自滑动平均数值间的关系, 拟合两者间的回归曲线, 参考隶属函数特点(胡宝清, 2010; Tuan et al., 2011; Lu et al., 2012), 选取各评价因子的隶属函数类型(表2), 隶属函数取值范围为0–1(0表示在此环境下华中五味子无法生长或无法完成木脂素的合成和积累, 即该环境不适合华中五味子生长; 1表示该环境下华中五味子木脂素的生成和积累达到最大, 即最适宜华中五味子生长)。隶属函数取值越大, 表示越适合华中五味子生长。用Matlab 2011对各因子的隶属函数进行误差检验, 得到所有隶属函数的拟合度为80%–95%(表2), 平均为89%, 说明模型准确可用。使用二元对比法确定顶层土壤USDA分类(TTEX)因子的隶属度(表3), 在研究区9类土壤中只有5类(黏土、壤土、砂质黏壤土、砂质壤土和壤质砂土)分布广泛且适合华中五味子生长。多数因子对华中五味子木脂素含量的影响既有下限又有上限, 因此本研究所选用的隶属函数类型主要为高斯型; 同时对木脂素含量的影响只有下限没有上限的定量因子采用升梯形隶属函数; 对只有上限没有下限的定量因子则采用降梯形隶属函数。根据所拟合的隶属函数计算出各评价因子的最优值和阈值(表4)。最优值即隶属度为1时环境因子的数值; 而根据隶属函数的概念, 阈值指隶属函数值无限接近于0时环境因子的数值。将每个样点的原始统计数据导入各隶属函数公式(表2, 表3), 把不规则分布、有单位的、定量或定性描述的原始数值转化为无量纲差异的隶属度, 从而实现原始统计数据的标准化。

表1 华中五味子生境适宜性评价指标

Table 1 Evaluation index of ecology suitability of *Schisandra sphenanthera*

Classification	Index
Climatic factor	Average temperature of growth* (ATG), Precipitation of growth* (PG), Sunshine hours (SH), Annual relative humidity (ARH), Minimum temperature of coldest month (TMIN) and Maximum temperature of warmest month (TMAX)
Soil factor	Topsoil USDA texture classification (TTEX), Topsoil pH (PH), Total nitrogen of soil (TN), Total phosphorus of soil (TP), Total potassium of soil (TK) and Topsoil organic carbon (TOC)
Topographical factor	Elevation above sea level (ASL), Slope (SLOP) and Aspect (ASPE)

生长期为5–8月。 The growth period is from May to August.

表2 评价因子的隶属函数及拟合度

Table 2 Membership function of evaluation factors and fitting degree

Evaluation condition	Membership function			
	Deoxyschizandrin	Fitting degree	γ-schizandrin	Fitting degree
ATG	$y = e^{-\left(\frac{x-20.45}{2.16}\right)^2}$	88%	$y = e^{-\left(\frac{x-15.8}{5.26}\right)^2}$	95%
PG	$y = 0.9 \times e^{-\left(\frac{x-543.3}{42.21}\right)^2} + 0.1 \times e^{-\left(\frac{x-486.1}{24.47}\right)^2}$	86%	$y = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-469}{42.25}\right)^2} & x \leq 500 \\ 0.67 & x > 500 \end{cases}$	88%
SH	$y = e^{-\left(\frac{x-1944}{309.1}\right)^2}$	90%	$y = e^{-\left(\frac{x-2155}{181}\right)^2} + 0.7 \times e^{-\left(\frac{x-1676}{238.3}\right)^2}$	93%
ARH	$y = e^{-\left(\frac{x-68.5}{8.46}\right)^2}$	84%	$y = e^{-\left(\frac{x-64.4}{3.63}\right)^2} + 0.72 \times e^{-\left(\frac{x-72.4}{3.17}\right)^2}$	92%
TMIN	$y = e^{-\left(\frac{x+5}{2.97}\right)^2}$	88%	$y = e^{-\left(\frac{x+9.875}{5.03}\right)^2}$	88%
TMAX	$y = e^{-\left(\frac{x-27.3}{2.16}\right)^2}$	91%	$y = e^{-\left(\frac{x-25.1}{3.53}\right)^2}$	87%
PH	$y = e^{-\left(\frac{x-6.4}{1.89}\right)^2}$	88%	$y = e^{-\left(\frac{x-7.06}{3.02}\right)^2}$	90%
TN	$y = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-0.108}{0.064}\right)^2} & x \leq 0.17 \\ 0.9 \times e^{-\left(\frac{x-0.22}{0.048}\right)^2} & x > 0.17 \end{cases}$	89%	$y = e^{-\left(\frac{x-0.19}{0.11}\right)^2}$	95%
TP	$y = e^{-\left(\frac{x-0.063}{0.124}\right)^2}$	84%	$y = e^{-\left(\frac{x-0.12}{0.10}\right)^2}$	87%
TK	$y = \begin{cases} 1 & x \leq 1.4 \\ -0.405x + 1.5675 & 1.4 < x \leq 3.8 \\ 0 & x > 3.8 \end{cases}$	93%	$y = \begin{cases} 0.43 & x < 1.7 \\ 2.8x^2 - 9.60x + 8.65 & 1.7 < x < 2.16 \\ 1 & x > 2.16 \end{cases}$	89%
TOC	$y = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-2.6}{1.84}\right)^2} & x \leq 4.2 \\ 0.92 \times e^{-\left(\frac{x-5.6}{1.33}\right)^2} & x > 4.2 \end{cases}$	91%	$y = e^{-\left(\frac{x-6.7}{6.33}\right)^2}$	84%
ASL	$y = e^{-\left(\frac{x-1143}{454}\right)^2}$	92%	$y = e^{-\left(\frac{x-1463}{558}\right)^2}$	96%
SLOP	$y = \begin{cases} 0.0153x + 0.4262 & x \leq 38 \\ 1 & x > 38 \end{cases}$	80%	$y = \begin{cases} 1 & x \leq 12.5 \\ -0.0752x + 1.95 & 12.5 < x \leq 20 \\ 0.76 \times e^{-\left(\frac{x-39.57}{31.38}\right)^2} & x > 20 \end{cases}$	88%
ASPE	$y = e^{-\left(\frac{x-171}{182}\right)^2}$	84%	$y = e^{-\left(\frac{x-225}{304}\right)^2}$	86%

ATG: 生长期均温; PG: 生长期降水量; SH: 日照时数; ARH: 年相对湿度; TMIN: 年极低温; TMAX: 年极高温; PH: 土壤pH值; TN: 土壤全氮含量; TP: 土壤全磷含量; TK: 土壤全钾含量; TOC: 土壤有机碳含量; ASL: 海拔; SLOP: 坡度; ASPE: 坡向

ATG: Average temperature of growth; PG: Precipitation of growth; SH: Sunshine hours; ARH: Annual relative humidity; TMIN: Minimum temperature of coldest month; TMAX: Maximum temperature of warmest month; PH: Topsoil pH; TN: Total nitrogen of soil; TP: Total phosphorus of soil; TK: Total potassium of soil; TOC: Topsoil organic carbon; ASL: Elevation above sea level; SLOP: Slope; ASPE: Aspect

本研究利用客观赋权法(objective weighting method)中最大信息熵模型(Weber, 2011)确定野生华中五味子生境适宜性各评价因子的权重系数。各评价因

子对华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量的影响程度不同,这就需要根据每个评价指标的重要程度分别赋予不同的权重,这是生境适宜性评价结果是否

表3 顶层土壤USDA分类的隶属度

Table 3 Membership of topsoil USDA texture classification

TTEX	Membership of deoxyschizandrin	Membership of γ-schizandrin
Clay	1.00	0.31
Loam	0.36	0.82
Sandy clay loam	0.45	1.00
Sandy loam	0.98	0.37
Loamy sand	0.20	0.96

TTEX: 顶层土壤USDA分类。TTEX: Topsoil USDA texture classification.

准确的关键(陈海生等, 2009; 张义等, 2011)。最大信息熵模型是利用指标变异程度计算各自权重, 即经标准化后评价指标变异程度越大, 信息熵(公式(2))越小, 说明该指标提供的信息量越大, 对华中五味子果实木脂素含量的影响越大, 因而权重(公式(3))也应越大。根据信息熵定义(陈斌和丁世飞, 2007), 采用常用对数(ln)对所有评价指标的信息熵 E 进行定义。

$$E = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ij} \ln \mu_{ij} \quad (1)$$

式中, μ_{ij} 为经隶属函数(表2, 表3)标准化的各评价因

子数值, n 为评价指标的个数, m 为用于建模的样本数。

令 $u_i = \sum_{j=1}^m u_{ij}$, $k = \frac{1}{\ln m}$ 则第 i 个指标熵值归一化后为:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} \ln \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} \quad (2)$$

则评价指标的权重系数可表示为:

$$\theta_i = \frac{1}{n-E} [1 - e(\mu_{ij})] \quad (3)$$

综合考虑15个评价因子对华中五味子生境适宜性的作用, 采用加权平均法(weighted average method)计算华中五味子生境适宜性指数(陈海生等, 2009; Lu et al., 2012)。每个栅格单元的综合指数由各因子的权重和隶属度的乘积确定。利用ArcGIS 9.3软件中空间分析模块计算, 分别得到华中五味子基于五味子甲素和乙素含量的1 km × 1 km栅格单元生境适宜性评价指数。计算公式为:

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_j \times x_{ij} \quad (4)$$

式中, y_i 是第 i 个栅格生境适宜性指数, w_j 为第 j 个因子

表4 各评价因子最优值、阈值及权重

Table 4 The optimal value, threshold value and weight of each factor

Index system (units)	Deoxyschizandrin			γ-schizandrin		
	Optimum value	Threshold value	Weight (%)	Optimum value	Threshold value	Weight (%)
ATG (°C)	20.45	15, 25	10.15	15.8	5, 25	7.94
PG (mm)	543.3	450, 640	17.54	489	400	1.50
SH (h·a ⁻¹)	1 944	1 300, 2 600	8.07	2 155	1 300, 2 600	5.88
ARH (%)	68.5	62.1, 78.1	2.42	64.4	78.1	8.10
TMIN (°C)	-5	-13, 3	8.66	-9.8	-20, 3	19.13
TMAX (°C)	27.3	22	6.65	25.1	17	4.02
TTEX	Clay	-	7.61	Sandy clay loam	-	3.40
PH	6.4	8.6	3.15	7.06	4.1	0.76
TN (%)	0.108	0.30	3.47	0.19	0.4	13.83
TP (%)	0.063	0.35	6.65	0.12	0.35	13.83
TK (%)	<1.4	3.8	12.45	>2.1	1.7	7.53
TOC (%)	2.6	10	2.59	6.7	20	4.79
ASL (m)	1 143	2 400	7.70	1 463	2 800	6.51
SLOP (°)	>38	0	0.77	<12.5	75.67	1.75
ASPE (°)	171	360	2.12	225	0	1.03

ATG、PG、SH、ARH、TMIN、TMAX、PH、TN、TP、TK、TOC、ASL、SLOP和ASPE同表2。TTEX同表3。
ATG, PG, SH, ARH, TMIN, TMAX, PH, TN, TP, TK, TOC, ASL, SLOP and ASPE see Table 2. TTEX see Table 3.

权重, x_{ij} 为第*j*个指标的第*i*个栅格值。 y_i 的取值范围为0–1, 值越大, 表明该栅格单元越适合华中五味子生长。通过计算确定不同评价因子对华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量影响的权重(表4)。

1.2.5 模型验证

本研究使用均方根误差(root mean square error, RMSE)验证华中五味子生境适宜性评价模型的适用性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2} \quad (5)$$

式中, N 为样本数, P_i 是第*i*个预测值, Q_i 代表第*i*个观察值。RMSE值用来评估模拟值与实测值之间的一致程度(崔耀平等, 2012)。该值越小, 则模型预测值与实测值越接近, 表明模型效果越好(Li and Heap, 2011)。同时, 为了检验模型在秦岭以外地区的适用性, 从秦岭之外的4个采样地(河南修武、山西陵川、安徽金寨和浙江临安)收集了60个采样点的华中五味子样本, 使用相同方法检验模型对秦岭以外地区的适用性。

2 结果与讨论

2.1 秦岭地区华中五味子生境适宜性区划

基于五味子甲素或乙素含量, 并依据计算得到的各栅格单元生境适宜性评价指数, 可将秦岭地区华中五味子生境适宜性区划为3个等级(图2)。 $y < 0.3$ 为不适宜生境, $0.3 \leq y < 0.7$ 为适宜生境, $y \geq 0.7$ 为高适宜生境。同时, 利用ArcGIS 9.3软件的空间分析模块制图(图2), 并计算各生境的分布面积。结果显示, 基于华中五味子果实中五味子甲素含量的高适宜生境面积为57 204.10 km², 占研究区总面积的24%, 主要分布在甘肃陇南东部、四川广元、陕西商洛、河南三门峡北部以及湖北神农架周边地区(图2A); 而基于五味子乙素含量的高适宜生境面积为43 195.14 km², 占研究区总面积的18.12%, 主要分布在甘肃陇南西部、天水及周边地区、陕西安康部分地区以及湖北神农架林区(图2B)。最后, 经ArcGIS 9.3空间分析模块叠加, 得出秦岭地区华中五味子基于五味子甲素和乙素含量的潜在空间分布结果(图3)。

综合两种木脂素含量的适宜性评价指数, 将秦岭地区华中五味子生境区划为3个等级(图4)。果实中

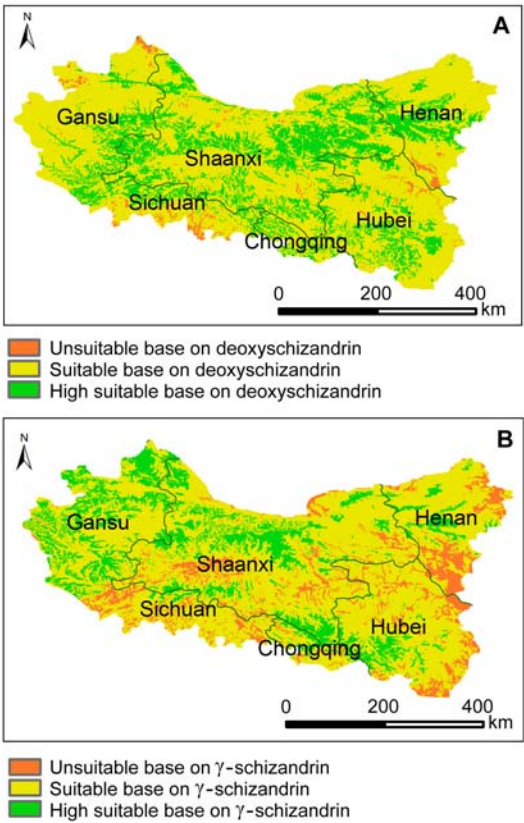


图2 秦岭地区基于木脂素含量的华中五味子生境适宜性分布 (A) 基于五味子甲素含量的华中五味子生境适宜性分布; (B) 基于五味子乙素含量的华中五味子生境适宜性分布

Figure 2 Habitat suitability distribution of *Schisandra sphenanthera* in Qinling area based on content of lignans (A) Habitat suitability distribution of *Schisandra sphenanthera* based on content of deoxyschizandrin; (B) Habitat suitability distribution of *S. sphenanthera* based on content of γ -schizandrin

1种或2种木脂素(五味子甲素和五味子乙素)的生境适宜性指数 $y < 0.3$, 即为华中五味子不适宜生境, 此种生境占研究区总面积的11.40%, 主要分布在甘肃平凉、陕西汉中中部以及河南南阳北部。果实中两种木脂素的生境适宜性指数都为 $0.3 \leq y < 0.7$, 则为华中五味子适宜生境, 此种生境占研究区总面积的50.63%, 主要分布在四川广元和巴中, 陕西商洛部分地区, 河南洛阳西部, 三门峡南部以及湖北宜昌、襄樊东部和十堰; 果实中两种木脂素的生境适宜性指数都为 $y \geq 0.7$, 或一种为 $y \geq 0.7$, 同时另一种为 $0.3 \leq y < 0.7$, 即为华

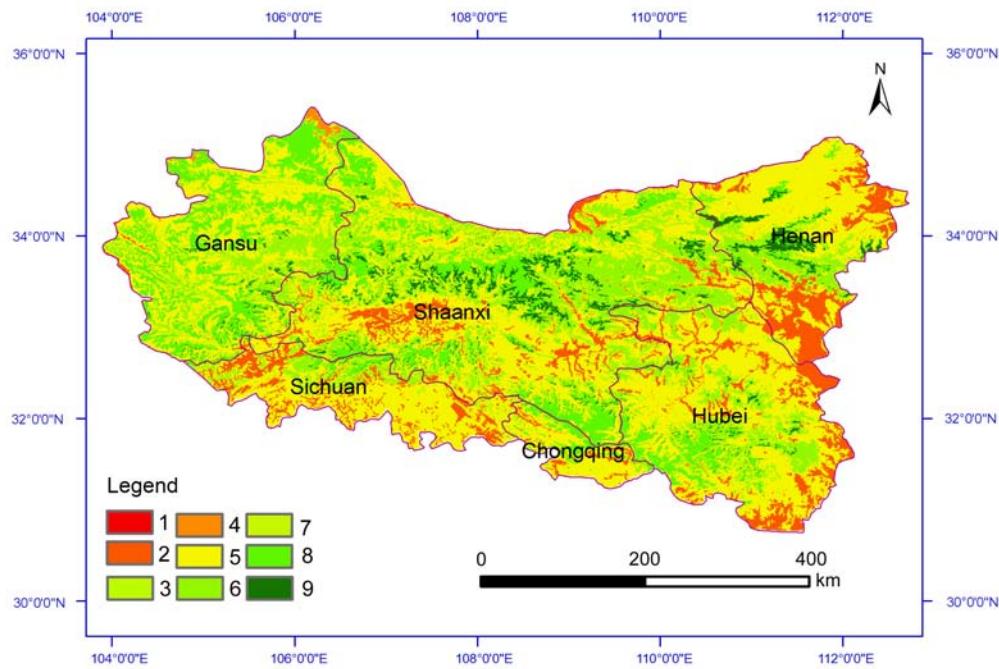


图3 秦岭地区华中五味子生境适宜性分类与分布

1: 甲素、乙素均不适宜; 2: 甲素适宜, 乙素不适宜; 3: 甲素高适宜, 乙素不适宜; 4: 甲素不适宜, 乙素适宜; 5: 甲素、乙素均适宜; 6: 甲素高适宜, 乙素适宜; 7: 甲素低适宜, 乙素高适宜; 8: 甲素适宜, 乙素高适宜; 9: 甲素、乙素均高适宜

Figure 3 Classify of habitat suitability distribution of *Schisandra sphenanthera* in Qinling area

1: No suitable for deoxyschizandrin and γ -schizandrin; 2: Suitable for deoxyschizandrin and no suitable for γ -schizandrin; 3: High suitable for deoxyschizandrin and no suitable for γ -schizandrin; 4: No suitable for deoxyschizandrin and suitable for γ -schizandrin; 5: Suitable for deoxyschizandrin and γ -schizandrin; 6: High suitable for deoxyschizandrin and suitable for γ -schizandrin; 7: Low suitable for deoxyschizandrin and high suitable for γ -schizandrin; 8: Suitable for deoxyschizandrin and high suitable for γ -schizandrin; 9: High suitable for deoxyschizandrin and γ -schizandrin

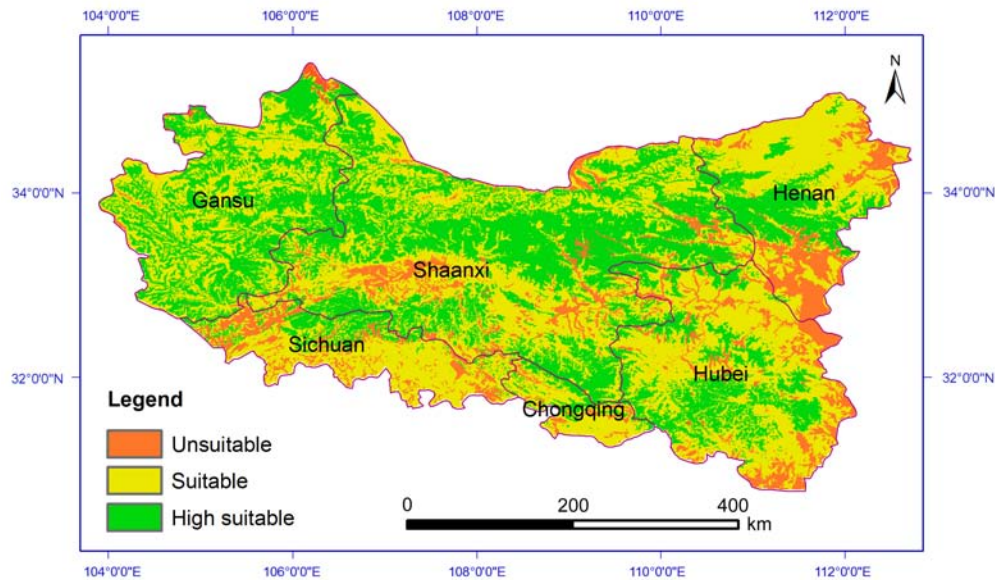


图4 秦岭地区华中五味子生境适宜性综合区划

Figure 4 Habitat suitability comprehensive distribution of *Schisandra sphenanthera* in Qinling area

中五味子高适宜生境,此种生境占研究区面积的37.97%,主要集中在陕西商洛和安康等地区,甘肃东部陇南和天水,河南洛阳南部、三门峡南部、南阳北部等地,以及湖北神农架及其周边海拔800–2 000 m的山区。在最适宜生境中,五味子甲素和乙素的生境适宜性指数均大于0.7的地区(图3,第9类生境)面积为8 084.48 km²,占研究区面积的3.39%,主要集中在陕西佛坪中南部、宁陕南部、丹凤北部、镇安西部及东南部、柞水西部和留坝中部,以及河南的卢氏中部和洛宁西部。

2.2 模型验证

本模型的RMSE检验结果为2.6%,小于10%,说明模拟值与实际观测值的一致性很高,模拟效果好(Rinaldi et al., 2003),证明该模型适用于研究华中五味子在秦岭地区的潜在空间分布。同时,对秦岭外的4个采样地数据进行检验, RMSE值为3.5%,表明模型也适用于研究秦岭以外的华中五味子的潜在空间分布。

2.3 讨论

2.3.1 模型构建及评价

评价结果的科学性和可靠性取决于基础数据的完整性,以及评价方法选择的合理性(陈海生等, 2009; 张义等, 2011)。GIS技术可对野生中药材道地产区的气候、土壤等生态因子进行定性定量解释、预测和模拟(黄林芳等, 2010)。模糊数学综合评价是应用模糊关系合成的原理,根据各评价因子不同数值与华中五味子果实中木脂素含量的隶属度关系实现原始统计数据的标准化的,进而实现未有专家经验支撑下的生境适宜性模型构建。最大信息熵模型利用观测数据所提供的信息确定权重系数,避免仅凭经验确定权重系数而产生的主观偏差,突出评价区域内限制性较强因子对评价对象的影响(Weber, 2011),从而提取影响野生华中五味子果实中不同木脂素含量的主导因子,探讨地理环境与道地药材形成的复杂关系,为保护和可持续利用野生药用资源提供技术支持。本研究以GIS技术为基础,通过探讨野生华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量与各生态因子之间的特定关系,并经统计与模型分析,确定了华中五味子果实中木脂素含量与各评价因子的隶属函数,计算出基于五味子甲素和

乙素含量的各生境因子最适范围,以最大信息熵模型确定各评价因子权重,客观准确地区划秦岭地区华中五味子不同生境类型的地理空间分布。

表4显示了不同评价因子对华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量影响的权重。从表4可以看出,气候、土壤和地形因子对华中五味子果实中五味子甲素影响的权重分别为53.49%、35.92%和10.59%;对果实中五味子乙素影响的权重则分别为46.57%、44.14%和9.29%。由此可见,气候因子对野生华中五味子果实中木脂素的形成和积累影响最大,土壤因子次之,地形因子的作用在大尺度上十分有限。土壤因子对五味子乙素的影响大于甲素。单评价因子方面,PG、TK、ATG、TMIN和SH对华中五味子果实中五味子甲素积累的影响较大,而对五味子乙素影响较大的因子有TMIN、TN、TP、ARH和ATG。植物只有在适当的温度、光照和水分条件下才能正常生长并积累物质。Trisurat等(2011)的研究表明,温度、水分和光照因素(尤其是春季和秋季)是控制植物生长的主要气候因子。本研究显示,温度、水分和光照等气候因子(表4)对华中五味子果实中五味子甲素和乙素含量影响的权重最大,这也说明气候因子的重要性。此外,土壤养分可直接或间接影响果实的生长,研究显示土壤中TN、TP和TK对果实中五味子乙素积累的影响较大,而TK和TP对五味子甲素积累的影响较大,表明土壤中N、P和K等营养成分在一定程度上影响着野生华中五味子的生长,这与华中五味子生长期需要N、K和P等营养元素,特别是雌株花期需要更多的N、P和Mg,果实成熟过程中需要大量的N、P和Zn的结果相一致(卜海东, 2008)。

2.3.2 秦岭地区华中五味子生境适宜性分析

由秦岭地区野生华中五味子潜在空间分布,及果实中五味子甲素和乙素的适宜性评价指数均大于0.3(适宜生境和高适宜生境)的面积占研究区面积的88.60%可得出结论:秦岭是我国华中五味子道地产区。15个评价因子(表5)中有9个因子(SH、ARH、TMAX、PH、TN、TP、ASL、SLOP和ASPE)对应于五味子甲素和乙素高适宜区的数值范围基本一致,而其它6个评价因子的高适宜生境范围却有所不同,说明华中五味子果实中五味子甲素和乙素的形成和积累,对环境气候及土壤因子需求既有相同的方面也有差异。由评价

表5 各评价因子基于华中五味子果实中五味子甲素和乙素的生境区划指标值
Table 5 Respective range of evaluation factors of different habitats suitability class base on deoxyschizandrin and γ -schizandrin

Index system (units)	Range	Deoxyschizandrin				γ -schizandrin			
		Unsuitable value	Suitable value	High suitable value	Unsuitable value	Suitable value	High suitable value	Unsuitable value	Suitable value
ATG (°C)	4.7-26.2	4.70-18.09	18.09-19.16	19.16-21.74	4.70-10.02	10.02-12.65	12.65-18.94	4.70-10.02	10.02-12.65
PG (mm)	400.3-645.25	22.82-26.2	21.74-22.82	521-561	21.57-26.2	18.94-21.57	443-500	21.57-26.2	18.94-21.57
		400-492	492-521		400-422	422-443		400-422	422-443
SH (h·a ⁻¹)	1 304.7-2 503.5	587-645	561-587	1 759-2 128	1 304-1 456	1 456-1 668	1 668-2 263	1 304-1 456	1 456-1 668
		1 304-1 604	1 604-1 759		2 353-2 503	2 263-2 353		2 353-2 503	2 263-2 353
ARH (%)	62.1-78.1	2 283-2 503	2 128-2 283	63.44-73.51	75.29-78.10	62.10-62.23	62.23-66.68	75.29-78.10	62.10-62.23
TMIN (°C)	-20.3-3.0	77.7-78.1	73.51-77.70	-6.77- -3.22	66.68-75.29	66.68-75.29	-12.88- -6.87	66.68-75.29	66.68-75.29
		-20.30- -8.25	-8.25- -6.77		-20.30- -15.39	-15.39- -12.88		-20.30- -15.39	-15.39- -12.88
TMAX (°C)	12.80-32.2	-1.74-3.00	-3.22- -1.74	26.01-28.60	-4.35-3.00	-6.87- -4.35	22.99-27.20	-4.35-3.00	-6.87- -4.35
		12.80-24.92	24.92-26.01		12.80-21.23	21.23-22.99		12.80-21.23	21.23-22.99
TTEX	9 classes (clay, silt clay loam, clay loam, silt loam, loam, sandy clay loam, sandy loam, clay loam, sandy loam, loamy sand, sand)	29.60-32.20	28.60-29.60	Clay, sandy loam	28.97-32.20	27.20-28.97	Loamy sand, loam, sandy clay loam	28.97-32.20	27.20-28.97
		Silt clay loam, clay loam, silt loam, sandy loam, sand	Loam, sandy clay loam		Silt clay loam, clay loam, sand, silt loam	Clay, sandy loam		Silt clay loam, clay loam, sand, silt loam	Clay, sandy loam
PH	4.1-8.5	4.10-4.32	4.32-5.27	5.27-7.52	-	4.10-5.26	5.26-8.50	-	4.10-5.26
TN (%)	0.03-0.81	8.47-8.50	7.52-8.47	0.069-0.15	0.03-0.069	0.069-0.124	0.124-0.26	0.03-0.069	0.069-0.124
		0.03-0.038	0.038-0.069		0.31-0.810	0.260-0.310		0.31-0.810	0.260-0.310
TP (%)	0.01-0.77	0.24-0.810	0.150-0.200	0.01-0.14	0.23-0.77	0.18-0.23	0.01-0.18	0.23-0.77	0.18-0.23
TK (%)	0.15-7.17	0.20-0.77	0.14-0.20	0.15-2.14	-	0.15-2.02	2.02-7.17	-	0.15-2.02
TOC (%)	0-30.7	3.12-7.17	2.14-3.12	1.50-3.69	13.65-30.7	0-2.92	2.92-10.48	13.65-30.7	0-2.92
ASL (m)	21-4 441	0-0.58	0.58-1.50	871-1 414	10.48-13.65	10.48-13.65	1 130-1 796	10.48-13.65	10.48-13.65
		6.29-30.70	3.69-4.90		21-851	851-1 130		21-851	851-1 130
SLOP (°)	0.11-75.67	21-644	644-871	17.90-75.67	2 075-4 441	1 796-2 075	0.11-16.62	2 075-4 441	1 796-2 075
		1 642-4 441	1 414-1 642		48.56-75.67	16.62-30.57		48.56-75.67	16.62-30.57
ASPE (°)	0-359.95	-	0-62.30	62.3-279.7	-	0-43.44	43.44-359.95	-	0-43.44

ATG、PG、SH、ARH、TMIN、TMAX、PH、TN、TP、TK、TOC、ASL、SLOP和ASPE同表2。TTEX: 同表3。

ATG、PG、SH、ARH、TMIN、TMAX、PH、TN、TP、TK、TOC、ASL、SLOP and ASPE see Table 2. TTEX see Table 3.

表6 秦岭地区华中五味子潜在分布区综合区划分省(直辖市)面积

Table 6 The area of habitat suitability comprehensive distribution of *Schisandra sphenanthera* in different province (municipality)

Habitat suitability class	Comprehensive distribution of <i>Schisandra sphenanthera</i> in Qinling area (km ²)					
	Shaanxi	Sichuan	Gansu	Chongqing	Hubei	Henan
Unsuitable area	9 577.06	3 800.23	681.35	442.57	6 269.10	6 402.07
Suitable area	48 035.61	9 544.73	17 713.83	5 594.53	23 618.98	16 153.27
High suitable area	46 571.46	4 262.12	19 043.50	1 457.07	12 378.52	6 787.70
Total	104 184.13	17 607.08	37 438.68	7 494.17	42 266.60	29 343.04

因子的最优值(表4)可知,果实中五味子甲素含量达到最大时,其适宜生境的ATG为20.45°C、TMAX为27.3°C、TMIN为-5°C;而五味子乙素达到最大时的适宜生境是ATG为15.8°C、TMAX为25.1°C、TMIN为-9.8°C,由此可推出华中五味子生长环境温度较高时更有利于五味子甲素的形成。五味子甲素生成与积累的最适宜ARH为68.5%、PG为543.3 mm,而五味子乙素形成的最适宜ARH与PG分别为64.4%和489 mm。年日照时数是影响植物生长的重要因素之一,生境中较高的SH(2 155 h·a⁻¹)有利于果实中五味子乙素的生成和积累;较低的SH(1 944 h·a⁻¹)利于五味子甲素的形成,表明较为阴湿的环境更有利于华中五味子果实中五味子甲素的形成。此外,本研究还发现中性砂质黏壤土中全钾和有机碳含量较高时有利于果实中五味子乙素的生成,偏酸粘土中全钾和有机碳含量较低时则利于五味子甲素的形成。较高海拔(1 463 m)以及平缓的阴坡有利于五味子乙素的生成,而较低海拔(1 143 m)以及较大坡度的阳坡和半阴坡有利于五味子甲素的积累。

本研究结果显示,基于华中五味子果实中五味子甲素含量的高适宜生境,五味子甲素含量平均为0.939%–1.342%,集中分布在研究区东北部海拔800–1 500 m的山区,如陕西商洛、汉中,河南三门峡南部,以及甘肃陇南东部,这些地区PG为400–570 mm,TK介于1.9%–2.4%之间,ATG为19–23°C, TMIN为-7–-2°C。而基于五味子乙素的高适宜生境,其果实中五味子乙素的含量平均为1.583%–2.262%,集中分布在研究区西部甘肃境内海拔1 200–1 800 m的山区、陕西安康以及湖北神农架林区及其周边,这些地区TMIN为-12–-5°C,TP为0.082%–0.27%,TN为0.153%–0.24%,ARH为62%–68%,ATG为12–

18°C。

两种木脂素形成的适宜生境占研究区总面积的50.63%,该类生境在陕西分布最多(表6),面积为48 035.61 km²,集中分布于安康中部海拔400–900 m的山区,该区域ATG为19–23°C, TMIN为-2–1°C, PG为520–550 mm, SH为1 560–1 680 h·a⁻¹, TTEX主要为壤土;湖北(23 618.98 km²)次之,成片分布于十堰地区海拔600–800 m的山区,其ATG为18–23°C, TMIN为-3–0°C, PG为520–550 mm, SH为1 686–1 894 h·a⁻¹, TTEX为壤土以及壤质砂土;在河南分布面积为16 153.27 km²,主要成片分布于洛阳南部与三门峡南部海拔600–1 000 m的区域,该地区ATG为21–24°C, TMIN为-7–-4°C, PG为420–470 mm, SH为2 064–2 290 h·a⁻¹, TTEX主要为壤土和砂质壤土。两种木脂素形成的高适宜生境占研究区面积的37.97%,该类生境在陕西分布面积(46 571.46 km²)最大,占秦岭高适宜生境区51.46%,集中于商洛和安康等地;甘肃(19 043.50 km²)次之,占高适宜生境21.04%,主要分布在陇南和天水;湖北的高适宜生境(12 378.52 km²)占秦岭高适宜生境13.68%,集中分布在神农架地区;河南占7.50%,主要集中在河南洛阳南部、三门峡南部以及南阳北部等地。高适宜生境区通常海拔为800–2 000 m,华中五味子生长期的平均气温为12–20°C,湿度适宜,稳定在62%–75%之间,年日照时数为1 700–2 100 h·a⁻¹,这种气候条件有利于华中五味子果实的生长。

2.3.3 秦岭地区野生华中五味子的保护建议

野生华中五味子的保护首先应选取高适宜生境或适宜生境区加以管理,特别是在华中五味子野生抚育GAP基地选址和建设时,应充分考虑其适宜生境。依

据华中五味子果实中不同木脂素含量有针对性地建设基地。结合国家“天保工程”和“退耕还林”工程建设,在退耕坡地、林间空地、林缘及郁闭度较低的林地补植幼苗;同时在华中五味子潜在分布区,尤其是高适宜生境区,如陕西佛坪中南部、宁陕南部、丹凤北部、镇安西部及东南部、柞水西部、留坝中部,河南卢氏中部及洛宁西部等地区,加大宣传保护力度,严厉制止抢青采摘和砍藤取果等现象发生。提倡野生抚育,加快收集优良种质,并进行人工繁育,以扩大野生华中五味子种群的数量,保证道地野生药材物种的可持续利用,满足药材市场的需求。

致谢 本研究野外实验得到陕西师范大学任毅教授和田先华教授的大力支持;在采样、检测及数据统计等方面先后得到卜海东、魏南玉、齐永平、罗成、李宗霖、孙茂、刘锦、吴生、熊宇婷、徐敏、刘小霞和张维等同学的帮助;人地系统专题数据库、中国气象数据共享服务系统以及中国科学院国际科学数据服务平台为本研究提供了数据支持,在此一并致谢。

参考文献

- 卜海东 (2008). 华中五味子地上部分生长发育动态研究. 硕士论文. 西安: 陕西师范大学. pp. 27–35.
- 陈斌, 丁世飞 (2007). 基于信息熵的模糊物元模型预测玉米螟种群动态. 数学的实践与认识 37, 78–82.
- 陈海生, 刘国顺, 刘大双, 陈伟强 (2009). GIS支持下的河南省烟草生态适宜性综合评价. 中国农业科学 42, 2425–2433.
- 崔耀平, 刘纪远, 胡云锋, 王军邦, 匡文慧 (2012). 城市不同下垫面辐射平衡的模拟分析. 科学通报 57, 465–473.
- 国家药典委员会 (2010). 中华人民共和国药典(2010年版1部). 北京: 中国医药科技出版社. pp. 227–228.
- 胡宝清 (2010). 模糊理论基础. 武汉: 武汉大学出版社. pp. 330–331.
- 胡理乐, 张海英, 秦岭, 闫伯前 (2012). 中国五味子分布范围及气候变化影响预测. 应用生态学报 23, 2445–2450.
- 黄林芳, 谢彩香, 陈士林, 段宝忠, 孙成忠, 凯撒·苏来曼, 王丽芝 (2010). 沙生药用植物锁阳产地适宜性的定量评价. 植物学报 45, 205–211.
- 康慕谊, 朱源 (2007). 秦岭山地生态分界线的论证. 生态学报 27, 2774–2784.
- 吴建国, 吕佳佳, 周巧富 (2010). 气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响. 植物学报 45, 723–738.
- 张义, 谢永生, 郝明德 (2011). 黄土沟壑区王东沟流域苹果品质限制性生态因子探析. 中国农业科学 44, 1184–1190.
- 中国科学院中国植物志编辑委员会 (1996). 中国植物志(第30卷第1分册). 北京: 科学出版社. pp. 258–260.
- 中国科学院中国自然地理编辑委员会 (1985). 中国自然地理总论. 北京: 科学出版社. pp. 270–276.
- 朱源, 康慕谊 (2005). 排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用. 生态学杂志 24, 807–811.
- Dussault C, Courtois R, Ouellet JP (2006). A habitat suitability index model to assess moose habitat selection at multiple spatial scales. *Can J Forest Res* 36, 1097–1107.
- Gu W, Wei NY, Wang ZZ (2008). LC analysis of lignans from *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. *Chromatographia* 67, 979–983.
- Li J, Heap AD (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. *Ecol Inform* 6, 228–241.
- Lu CY, Gu W, Dai AH, Wei HY (2012). Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: a case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. in Qinling Mountains, China. *Ecol Model* 242, 105–115.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Model* 190, 231–259.
- Podchong S, Schmidt-Vogt D, Honda K (2009). An improved approach for identifying suitable habitat of Sambar deer (*Cervus unicolor* Kerr) using ecological niche analysis and environmental categorization: case study at Phu-Khieo Wildlife Sanctuary, Thailand. *Ecol Model* 220, 2103–2114.
- Rinaldi M, Losavio N, Flagella Z (2003). Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agr Syst* 78, 17–30.
- Saunders RMK (2000). Monograph of *Schisandra* (Schisandraceae). *Syst Bot Monogr* 58, 1–146.
- Singh A, Kushwaha SPS (2011). Refining logistic regression models for wildlife habitat suitability modeling—A case study with muntjak and goral in the Central Himalayas, India. *Ecol Model* 222, 1354–1366.
- Smith AC (1947). The families Illiciaceae and Schisandraceae. *Sargentia* 7, 1–244.
- Tian SQ, Chen XJ, Chen Y, Xu LX, Dai XJ (2009). Evalu-

ating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommatrephe bratramii* in the northwestern Pacific Ocean. *Fish Res* **95**, 181–188.

Trisurat Y, Shrestha RP, Kjellgren R (2011). Plant species vulnerability to climate change in Peninsular Thailand. *Appl Geogr* **31**, 1106–1114.

Tuan NT, Qiu JJ, Verdoodt A, Li H, Van Ranst E (2011).

Temperature and precipitation suitability evaluation for the winter wheat and summer maize cropping system in the Huang-Huai-Hai plain of China. *Agr Sci China* **10**, 275–288.

Weber TC (2011). Maximum entropy modeling of mature hardwood forest distribution in four U.S. states. *Forest Ecol Manag* **261**, 779–788.

Deoxyschizandrin and γ -Schizandrin Content in Wild *Schisandra sphenanthera* to Determine Potential Distribution in Qinling Mountains

Yanlong Guo^{1,2}, Wei Gu^{1,3*}, Chunyan Lu^{1,2}, Haiyan Wei^{2*}

¹National Engineering Laboratory for Resource Development of Endangered Crude Drugs in Northwest of China, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; ²College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; ³College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract *Schisandra sphenanthera* is the third-class conservation of wild medicinal species. It is widely distributed in Qinling Mountains. We collected *S. sphenanthera* samples at 307 sampling points in 19 sampling sites and extracted deoxyschizandrin and γ -schizandrin by high-performance liquid chromatography. We used “fuzzy theory” to determine the association of deoxyschizandrin and γ -schizandrin content and 15 assessment factors, including climate, soil and topographic factors. Then we used the maximum entropy model to determine the weight of each factor. Finally, we estimated the spatial distribution of *S. sphenanthera* in Qinling Mountains by the weighted average method and GIS spatial analysis. The proportion of unsuitable, suitable and high-suitable habitat for *S. sphenanthera* in Qinling Mountains was 11.40%, 50.63%, and 37.97%, respectively. The high-suitable habitat are mainly located in southern Shaanxi, eastern Gansu, western Henan, Shennongjia in Hubei, and the surrounding area, with elevation 800 to 2 000 m. This habitat-suitability assessment model based on GIS and fuzzy logic could be used to accurately determine the habitat suitability of *S. sphenanthera*, quantify the area of suitable habitat and analyze the spatial distribution. This information would supply scientific evidence for the choice of GAP and construction and advice for protection and sustainable utilization of resources.

Key words *Schisandra sphenanthera*, GIS, membership function, habitat suitability, Qinling Mountains

Guo YL, Gu W, Lu CY, Wei HY (2013). Deoxyschizandrin and γ -schizandrin content in wild *Schisandra sphenanthera* to determine potential distribution in Qinling Mountains. *Chin Bull Bot* **48**, 411–422.

* Authors for correspondence. E-mail: weigu@snnu.edu.cn; weihy@snnu.edu.cn