

DOI: 10.5846/stxb201309122261

高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 基于层次分析法和 GIS 的秦岭地区魔芋潜在分布研究. 生态学报, 2015, 35(21): - .

Gao B, Wei H Y, Guo Y L, Gu W. Potential distribution of *Amorphophallus rivieri* in the Qinling Mountains Based on Analytic Hierarchy Process and Geographic Information System. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): - .

## 基于层次分析法和 GIS 的秦岭地区魔芋潜在分布研究

高 蓓<sup>1,3</sup>, 卫海燕<sup>1,\*</sup>, 郭彦龙<sup>1</sup>, 顾 蔚<sup>2</sup>

1 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062

2 陕西师范大学生命科学学院, 西安 710062

3 陕西省农业遥感信息中心, 西安 710015

**摘要:** 魔芋 (*Amorphophallus rivieri*) 为我国传统的食用与药用植物, 主产于秦岭以南地区。本文依据陕西秦岭地区 28 个魔芋分布点信息, 利用秦岭地区 45 个气象台站 1961—2010 年气候资料、土壤数据 (分辨率 1 km) 和 DEM 高程数据 (分辨率 30 m), 结合前人研究, 通过魔芋产量与环境指标的相关性分析, 获取相关性显著的 20 个评价指标, 包括气候指标 13 个、土壤指标 4 个和地形指标 3 个, 运用 GIS 技术和多元回归模型对气候指标进行栅格化处理, 基于层次分析法和加权平均法获得评价指标权重, 建立陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布模型, 确定魔芋潜在种植的空间分布。结果显示: 陕西秦岭地区魔芋最适宜种植区面积 1 214.42 km<sup>2</sup>, 占可种植区面积的 10.18%; 适宜种植区面积 2 015.60 km<sup>2</sup>, 占可种植区面积的 16.90%; 次适宜种植区面积 3 115.03 km<sup>2</sup>, 占可种植区面积的 26.12%; 不适宜种植区面积 5 580.02 km<sup>2</sup> 占可种植区面积的 46.80%。适宜魔芋潜在种植区域主要分布在陕西汉中中南部、安康中南部以及商洛东南部。

**关键词:** 层次分析法; GIS; 潜在种植分布; 魔芋; 陕西秦岭地区

## Potential distribution of *Amorphophallus rivieri* in the Qinling Mountains Based on Analytic Hierarchy Process and Geographic Information System

GAO Bei<sup>1,3</sup>, WEI Haiyan<sup>1,\*</sup>, GUO Yanlong<sup>1</sup>, GU Wei<sup>2</sup>

1 College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xian 710062, China

2 College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xian 710062, China

3 Remote Sensing Information Center for Agriculture of Shaanxi Province, Xian 710015, China

**Abstract:** *Amorphophallus rivieri* (the corpse flower) is a traditional edible and medicinal plant in China. This species is distributed in the south part of the Qinling Mountains, China. We assimilated data about *A. rivieri* cultivation, environmental information from 28 sampling sites in the Qinling Mountains, climate data from 45 weather stations in the Qinling Mountains from 1961 to 2010, soil data with 1 km × 1 km spatial resolution and DEM data with 30 m × 30 m spatial resolution in the Qinling Mountains, *A. rivieri* data collected throughout China, and a specific report on *A. rivieri* in Shaanxi Province. We obtained 20 assessment factors that were significantly correlated when evaluating *A. rivieri* yield against environmental factors. The key environmental factors affecting the distribution of *A. rivieri* cultivation included 13 dominant climate factors, 4 dominant soil factors, and 3 dominant topographical factors. These dominant factors were 1) Frost-free duration (D), 2) Annual average temperature ( $T_n$ ), 3) Annual total active temperature ( $\geq 10^\circ\text{C}$ ) ( $T_{\geq 10\text{djw}}$ ), 4) Monthly mean maximum temperature from July to August ( $T_{78zg}$ ), 5) Annual precipitation ( $P_n$ ), 6) Monthly mean daily temperature range from July to September ( $T_{79gc}$ ), 7) Monthly mean temperature from May to October ( $T_{510p}$ ), 8)

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (31070293); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAI06A13-06)

**收稿日期:** 2013-09-12; **网络出版日期:** 2015-04-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weihiy@snnu.edu.cn

Monthly mean temperature from July to August ( $T_{78p}$ ), 9) Monthly mean relative air humidity from July to August ( $Q_{78}$ ), 10) June precipitation ( $P_6$ ), 11) July precipitation ( $P_7$ ), 12) August precipitation ( $P_8$ ), 13) September precipitation ( $P_9$ ), 14) Topsoil depth (H), 15) Topsoil pH( $H_2O$ ) (PH), 16) topsoil texture classification (C), 17) Topsoil organic matter (O), 18) Aspect (A), 19) Slope (S), 20) Altitude elevation (h). Using Geographic Information System (GIS) and a multivariate regression model, the climate factors were rasterized. Then, we used fuzzy mathematics analysis, analytic hierarchy process (AHP), and the weighted means method to set up the subjection function and determine the weight of each factor. We set up a model of ecological suitability for *A. rivieri* in the Qinling Mountains of Shaanxi Province, and determined the spatial distribution of suitable planting areas for this species. The root-mean-square error (RMSE) was used to evaluate the accuracy of the model predictions. The RMSE value reached 7.8%, which indicated that the predictive accuracy of the model was “Excellent.” The results showed that the ecological planting suitability model identified a relationship between potential *A. rivieri* cultivation distribution and the environmental factors. Highly suitable, moderately suitable, marginally suitable, and unsuitable planting areas of 1 214.42 km<sup>2</sup>, 2 015.60 km<sup>2</sup>, and 3 115.03 km<sup>2</sup>, and 5 580.02 km<sup>2</sup> were identified for *A. rivieri*, respectively. The potential suitable planting areas for *A. rivieri* were mainly distributed in the south central part of Hanzhong district, the south central part of Ankang district, and the southeast part of Shanluo district. This information on the potential suitable planting area of *A. rivieri* is valuable for providing baseline data, scientific information, and a research platform for understanding the ecology, geography, and environmental science of this important medicinal species.

**Key Words:** AHP; GIS; Potential planting distribution; *Amorphophallus rivieri*; Qinling mountains of Shaanxi Province

魔芋(*Amorphophallusrivieri*)又名蒟蒻,主产于秦岭以南的山区或高原地区,是我国传统食用与药用植物<sup>[1,2]</sup>。陕西秦岭地区是我国魔芋种植的传统区域,是中国南北气候的分界线,也是生态自然环境保存较好的区域<sup>[3-5]</sup>。科学的划分农作物种植区对该区域生态平衡的维持、生态系统稳定性的维护、可持续发展中生态与经济关系的协调都有重要影响。目前国内外对魔芋研究主要集中于种质资源<sup>[6,7]</sup>、遗传多样性和基因挖掘<sup>[8]</sup>、育种<sup>[9]</sup>、栽培<sup>[10]</sup>、病害<sup>[11,12]</sup>、食品<sup>[13,14]</sup>和药用价值等方面<sup>[15-18]</sup>,随着人们对魔芋功效的逐渐了解,市场对魔芋的广泛需求,推动了魔芋种植面积的不断扩大,经济效益愈加明显,魔芋种植成为耕地紧张、耕作条件差的地区农民脱贫致富的一条路径<sup>[19]</sup>。由于缺少魔芋生存环境适宜性空间分布信息,导致魔芋产业盲目发展,不利于产业可持续发展。

物种生存环境适宜性研究是物种保护的重要环节,对物种资源利用有着重要意义<sup>[20]</sup>。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种定性和定量相结合、系统化、层次化的分析方法,为多目标、多准则以及内容复杂问题提供简便实用的决策方法<sup>[21]</sup>。由于具有处理复杂决策问题的实用性和有效性特点,该方法已在不同领域得到应用<sup>[22,23]</sup>,为物种适宜性研究提供了借鉴。

对魔芋的空间分布研究主要集中在气候指标对魔芋生长的影响、气候种植区划以及魔芋种质资源分布等方面<sup>[24-26]</sup>,其对魔芋的适宜性研究多以数理统计为主,或以行政区划为基本评价单元,精细化程度不够,而根据魔芋产量和生长期数据,综合考虑气候、土壤和地形的影响,来探讨魔芋种植适宜性评价和合理种植区化研究未见报道。本文利用陕西秦岭地区 DEM 数据、土壤数据和气象台站资料,以魔芋生长密切相关的生态要素作为评价指标,采用层次分析法和加权平均法<sup>[27]</sup>,应用 ArcGIS 软件,对陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布进行区划,为客观调控和指导魔芋适宜性规模种植提供基础资料,为当地种植规划和经济发展提供参考依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究对象

魔芋性喜温凉,生长于海拔 250—2500 m 山间,一般于 3 月中旬—4 月上旬发芽,10 月中旬—11 月收获。

生长条件为年平均气温 11℃以上,≥10℃积温 2900—8000℃·d,7—8 月月平均气温 12—26℃、月平均最高气温 15—35℃,块茎膨大期气象条件要求为 7—9 月日温差≥10℃,年降雨量 800 mm 以上,6—9 月月降雨量 100—200 mm,7—8 月月平均相对湿度 76%—90%,无霜期 220 d 以上<sup>[28]</sup>。影响魔芋生长的主要气象灾害是春季倒春寒、夏季干旱与延迟性冷害和秋季连阴雨。

适宜魔芋生长的主要土壤条件为土层深度达 30 cm 以上,有机质含量丰富、土层深厚、土壤疏松肥沃的壤土,种植适宜的 pH 值 6.5—7.0<sup>[24]</sup>。适宜魔芋生长的地形特征为湿度较高的稍倾斜的背风地带,具有灌溉条件且夏季暴雨不致土壤严重冲刷的地段<sup>[28]</sup>。

1.2 数据来源

本文的魔芋分布点位置与环境数据来源于西南大学中国魔芋中心“魔芋种质资源的调查研究和保存”项目、《中国魔芋种植区划》<sup>[26]</sup>和中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)以及陕西省安康市魔芋产业技术研究中心的陕西省魔芋调查报告及实验数据,其中从中国数字植物标本馆获得研究区 20 个分布点信息,由相关文献获得研究区 12 个分布点信息,由“魔芋种质资源的调查研究和保存”项目获得研究区 8 个分布点信息,由陕西省魔芋调查报告及实验数据获得研究区 22 个分布点 61 个样方数据,剔除重复点数据,共获得陕西秦岭地区 28 个分布点 67 个样方数据。陕西省秦岭地区魔芋产量面积数据来源于陕西农业厅。

生态环境适宜性评价因子的选择是评价的关键<sup>[29]</sup>,依据魔芋产量与环境条件指标的相关分析以及魔芋生长特点,选择了 13 个气候、4 个土壤和 3 个地形因子构建陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布的环境评价指标(表 1),其中气象数据来自陕西省 46 个气象站 1961—2010 年逐日观测数据,土壤数据和地形数据来自中科院国际科学数据服务平台(ISDSP,<http://datamirror.csdb.cn>),土壤栅格数据的分辨率为 1 km,高程数字模型(DEM)的分辨率为 30 m。陕西省 1:10 万土地利用数据来自于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。

表 1 陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布模型的评价指标

| Table 1 Evaluation factors of potential distribution of <i>A.rivieri</i> in Qinling mountains of Shaanxi province |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 类型 Type                                                                                                           | 指标 Factor                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 气候要素 Climatic factor                                                                                              | 无霜期( $D$ )、≥10℃积温( $T_{\geq 10d_{10}}$ )、年平均气温( $T_n$ )、7—8 月平均气温( $T_{78p}$ )、7—8 月平均最高气温( $T_{78g}$ )、生育期(5—10 月)平均气温( $T_{510p}$ )、7—9 月气温日温差≥10℃日数( $N_{79gc}$ )、年降雨量( $P_n$ )、6 月降雨量( $P_6$ )、7 月降雨量( $P_7$ )、8 月降雨量( $P_8$ )、9 月降雨量( $P_9$ )、7—8 月平均相对湿度( $Q_{78}$ ) |
| 土壤要素 Topsoil factor                                                                                               | 土壤 pH( $PH$ )、土壤类型( $C$ )、土壤有机质( $O$ )、耕层厚度( $H$ )                                                                                                                                                                                                                         |
| 地形要素 Topographical factor                                                                                         | 坡度( $S$ )、坡向( $A$ )、海拔( $h$ )                                                                                                                                                                                                                                              |

1.3 研究方法

1.3.1 候数据小网格化

参考山地无气象站地区气候要素的推算模拟方法,选用回归统计方法和对比分析方法<sup>[30]</sup>。利用研究区 46 个气象站的经度、纬度和海拔作为自变量,SPSS 进行多元回归分析,建立气象要素空间分布模型(表 2)。运用 ArcGIS 9.3 的空间插值模块,通过对比 Simple kriging、Original kriging、IDW 和 RBF 四种插值方法,选择能够较好反映局地气候垂直变化的 IDW 法进行空间插值。由于受地形起伏变化的影响,各气候指标的总体拟合精度不够高,为提高拟合精度,对气候指标的残差部分进行空间内插,以订正气候指标。将气候指标多元回归分析栅格图和残差的栅格分布图进行图像叠加,最终生成气候指标空间分布栅格图像。

1.3.2 评价指标的确定

影响魔芋生长和分布的因素很多,依据陕西秦岭地区各魔芋种植县的魔芋产量、魔芋生长期观测数据以及当地生态环境资料,采用定性与定量结合的方法,遵循客观性、区域差异性、主导性和可操作性等原则进行指标的筛选<sup>[31]</sup>。

表 2 陕西秦岭地区气候指标的空间推算模型  
Table 2 The small grid reckon model of climate factors in Qinling mountains of Shaanxi province

| 气候指标<br>Climate factor                                                                                                                                                  | 多元回归模型<br>Multiple regression model                                  | 相关系数<br>Correlation coefficient | F     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------|
| 无霜期( $D$ )<br>Frost-free duration                                                                                                                                       | $D = 1056.767 - 2.506\lambda - 12.976\varpi - 0.047h$                | 0.937 **                        | 215.7 |
| $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温( $T_{\geq 10dju}$ )<br>Annual total active temperature( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )                                        | $T_{\geq 10dju} = 5077.090 + 11.175\lambda - 33.443\varphi - 1.665h$ | 0.948 **                        | 268.1 |
| 年平均气温( $T_n$ )<br>Annual average temperature                                                                                                                            | $T_n = 36.775 - 0.017\lambda - 0.557\varphi - 0.005h$                | 0.972 **                        | 512.0 |
| 7—8 月平均气温( $T_{78p}$ )<br>Mean temperature from July to August                                                                                                          | $T_{78p} = 25.926 - 0.014\lambda + 0.117\varphi - 0.006h$            | 0.940 **                        | 228.3 |
| 7—8 月平均最高气温( $T_{78sg}$ )<br>Mean maximum temperature from July to August                                                                                               | $T_{78sg} = 16.754 + 0.082\lambda + 0.231\varphi - 0.006h$           | 0.954 **                        | 300.0 |
| 生育期(5—10 月)平均气温( $T_{510p}$ )<br>Mean temperature during growth duration (from May to October)                                                                          | $T_{510p} = 24.782 - 0.010\lambda + 0.012\varpi - 0.006h$            | 0.948 **                        | 268.0 |
| 7—9 月气温日温差 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数( $N_{79gc}$ )<br>The number of days of daily temperature range $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ from July to September | $N_{79gc} = 212.548 + 2.534\lambda - 0.953\varpi + 0.021h$           | 0.809 **                        | 51.2  |
| 年降雨量( $P_n$ )<br>Annual precipitation                                                                                                                                   | $P_n = 3194.238 + 13.454\lambda - 118.256\varpi + 0.172h$            | 0.876 **                        | 98.8  |
| 6 月降雨量( $P_6$ )<br>June precipitation                                                                                                                                   | $P_6 = 209.414 + 3.446\lambda - 15.415\varpi + 0.031h$               | 0.818 **                        | 60.7  |
| 7 月降雨量( $P_7$ )<br>July precipitation                                                                                                                                   | $P_7 = 1974.403 - 7.748\lambda - 30.139\varpi + 0.054h$              | 0.827 **                        | 20.6  |
| 8 月降雨量( $P_8$ )<br>August precipitation                                                                                                                                 | $P_8 = 1134.243 - 3.48\lambda - 19.657\varpi + 0.048h$               | 0.847 **                        | 21.6  |
| 9 月降雨量( $P_9$ )<br>September precipitation                                                                                                                              | $P_9 = 1244.676 - 5.576\lambda - 15.632\varpi + 0.013h$              | 0.873 **                        | 95.7  |
| 7—8 月平均相对湿度( $Q_{78}$ )<br>Mean relative humidity from July to August                                                                                                   | $Q_{78} = 208.321 - 0.333\lambda - 2.907\varpi + 0.004h$             | 0.860 **                        | 85.0  |

注:降雨量、气温、积温、无霜期和相对湿度的单位分别是 mm、 $^{\circ}\text{C}$ 、 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、d 和%;“\*\*”表示通过了 0.01 的显著性水平检验

1.3.3 综合评价体系构建

构建各评价指标权重<sup>[27]</sup>,以确定魔芋潜在种植分布的权重评价体系,即影响魔芋生长的 3 个准则层评价因素(气候、土壤和地形),20 个评价指标(表 1)对魔芋潜在种植分布的影响作用是不同的,这就需要根据每个评价指标影响作用的重要程度分别赋予不同的权重(表 3)。邀请 12 位在魔芋栽培、病害、种质资源、魔芋产品开发和土壤领域有丰富知识经验的专家和技术人员参加问卷填写,将课题研究的目的告诉专家,请专家根据多年的实践经验填写调查问卷。首先分别在各层中评价因子之间作两两重要性定量判断比较;其次根据判断矩阵计算上一层次指标与本层次相关因素之间的重要性次序的权重值(权向量);然后进行层次单排序和层次总排序,并对 AHP 构造的判断矩阵进行一致性检验,即  $CI$ (Consistency index)与判断矩阵的平均随机一致性指标  $RI$ (Random index)的比值  $CR$ (Consistency ratio)进行一致性检验<sup>[27]</sup>。

经计算得出  $CI=0.06$ , $RI=1.19$ , $CR=CI/RI=0.049<0.10$ ,层次排序的结果具有满意的一致性。

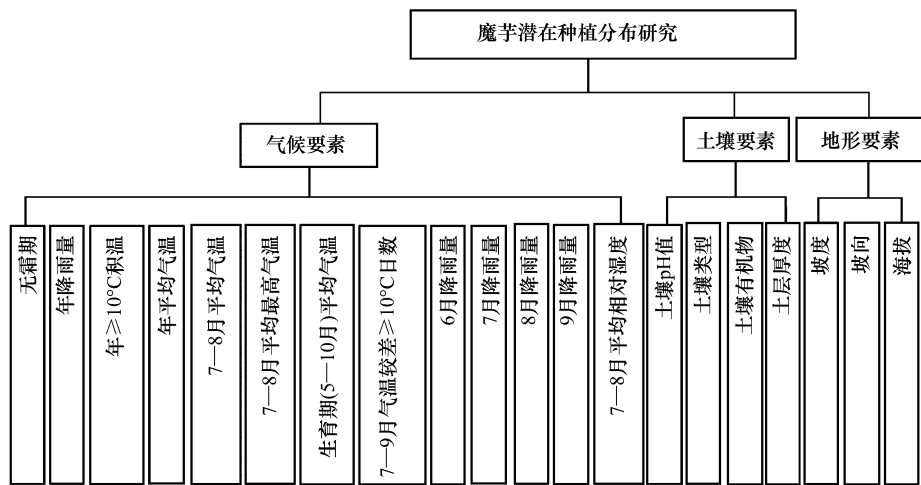


图 1 陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布研究结构

Fig. 1 Structure of *A.rivieri* Potential distribution evaluation in Qinling mountains of Shaanxi province

表 3 魔芋潜在种植分布研究评价指标的 AHP 权重

| Table 3 Index weights of analytic hierarchy process of the function of potential distribution suitability of <i>A.rivieri</i> |           |                                                        |           |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|-----------|------------------|
| 一级指标 First factor                                                                                                             | 权重 Weight | 二级指标 Second factor                                     | 权重 Weight | 总权重 Totle weight |
| 气候要素 Climatic factor                                                                                                          | 0.57      | 无霜期 ( $D$ )                                            | 0.14      | 0.0798           |
|                                                                                                                               |           | $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 ( $T_{\geq 10d_{ju}}$ )   | 0.11      | 0.0627           |
|                                                                                                                               |           | 年平均气温 ( $T_n$ )                                        | 0.13      | 0.0741           |
|                                                                                                                               |           | 7—8 月平均气温 ( $T_{78p}$ )                                | 0.07      | 0.0399           |
|                                                                                                                               |           | 7—8 月平均最高气温 ( $T_{78sg}$ )                             | 0.10      | 0.0570           |
|                                                                                                                               |           | 生育期(5—10 月)平均气温 ( $T_{510p}$ )                         | 0.08      | 0.0456           |
|                                                                                                                               |           | 7—9 月气温日温差 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日数 ( $N_{79gc}$ ) | 0.10      | 0.0570           |
|                                                                                                                               |           | 年降雨量 ( $P_n$ )                                         | 0.10      | 0.0570           |
|                                                                                                                               |           | 6 月降雨量 ( $P_6$ )                                       | 0.03      | 0.0171           |
|                                                                                                                               |           | 7 月降雨量 ( $P_7$ )                                       | 0.03      | 0.0171           |
|                                                                                                                               |           | 8 月降雨量 ( $P_8$ )                                       | 0.02      | 0.0114           |
|                                                                                                                               |           | 9 月降雨量 ( $P_9$ )                                       | 0.02      | 0.0114           |
|                                                                                                                               |           | 7—8 月平均相对湿度 ( $Q_{78}$ )                               | 0.07      | 0.0399           |
|                                                                                                                               |           |                                                        |           |                  |
| 土壤要素 Topsoil factor                                                                                                           | 0.26      | 土壤 pH ( $PH$ )                                         | 0.28      | 0.0728           |
|                                                                                                                               |           | 土壤类型 ( $C$ )                                           | 0.23      | 0.0602           |
|                                                                                                                               |           | 土壤有机质 ( $O$ )                                          | 0.22      | 0.0568           |
|                                                                                                                               |           | 耕层厚度 ( $H$ )                                           | 0.27      | 0.0702           |
| 地形要素 Topographical factor                                                                                                     | 0.17      | 坡度 ( $S$ )                                             | 0.35      | 0.0595           |
|                                                                                                                               |           | 坡向 ( $A$ )                                             | 0.37      | 0.0629           |
|                                                                                                                               |           | 海拔 ( $h$ )                                             | 0.28      | 0.0476           |

1.3.4 基于 GIS 综合评价模型的建立

采用加权平均法,通过模糊隶属函数标准化的指标值与层次分析法求出的每个评价指标的权重值<sup>[27,32]</sup>,利用公式(1)计算每个评价栅格的综合分。

$$S = \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n \chi_i \times \omega_i) \times \omega_j \tag{1}$$

式中  $S$  为魔芋潜在种植分布适宜度; $\chi_i$ 为二级指标的标准化值; $\omega_i$ 为二级指标权重; $\omega_j$ 为级指标权重; $m$ 为一级指标的个数; $n$ 为二级指标的个数。

1.3.5 模型检验

为了验证模型的适用性,选择陕西秦岭地区采样地的 6 个样本,利用均方根误差<sup>[32]</sup> (*RMSE*, root mean square error),检验魔芋种植区划评价模型的适用性。

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

(2)

式中 *N* 为样本数,*P<sub>i</sub>* 是第 *i* 个预测值,*Q<sub>i</sub>* 代表第 *i* 个观察值。均方根误差表示的预测值与实测值相应的接近程度,*RMSE* 越小,模型预测值与实际值越接近,模型效果越好。

本模型的 *RMSE* 检验结果为 7.8%,*RMSE* 值小于 10%,表明模拟值与实际观测值一致性很高,模拟效果可以接受<sup>[29]</sup>,证明该模型适用于陕西秦岭地区魔芋潜在空间分布研究。同时,对秦岭外的 6 个采样地数据进行检验,*RMSE* 值为 6.1%,表明模型也适用于研究陕西秦岭地区以外的魔芋潜在空间分布。

2 结果

采用分布指标叠加法来进行区域划分,运用 ArcGIS 空间分析模块,将 20 个评价指标按照魔芋潜在种植适宜性评价指标的评分标准(表 4)赋予相应的值。利用 GIS 综合评价模型(公式 1),计算出每个栅格的潜在种植适宜性综合评价值,并将栅格分值分为 4 个等级:潜在种植适宜性评价指数(*S*) 6.00—7.31 为最适宜区,5.00—6.00 为适宜区,4.00—5.00 为次适宜区,2.49—4.00 为不适宜区。考虑到魔芋种植有一定的局限性,参考陕西省 2004 年土地利用现状图,在魔芋适宜性区划时将居民区、水体、林地、灌丛和沙地等不适合种植区域剔除掉,得到陕西秦岭地区魔芋潜在种植适宜性区划图和空间分布图(图 2 和表 5)。该图符合实际,可以为政府部门决策和农民种植生产提供参考。

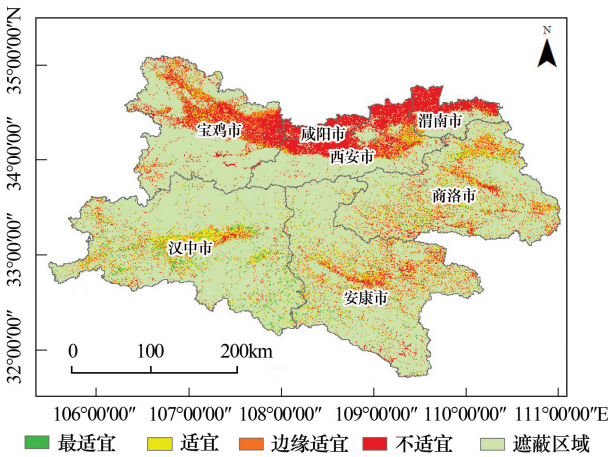


图 2 陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布适宜性区划  
Fig. 2 Potential distribution of evaluation on *A. ecosuitability* in Qinling mountains of Shaanxi province

表 4 魔芋潜在种植分布评价指标的评分标准

Table 4 Appraisal criterion of all division factors of potential suitability of *A. rivieri*

| 类型<br>Type              | 指标<br>Factor                       | 分值 Score     |                             |                            |                   |
|-------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
|                         |                                    | 8            | 6                           | 4                          | 2                 |
| 气候要素<br>Climatic factor | 无霜期( <i>D</i> )                    | 220—260 d    | >260 d                      | 200—220 d                  | <200 d            |
|                         | ≥10℃ 积温( $T_{\geq 10d_{10}}$ )     | >4000℃·d     | 2900—4000℃·d                | 2600—2900℃·d               | <2600℃·d          |
|                         | 年平均气温( $T_n$ )                     | 14—20℃       | 12—14℃                      | 9—12℃                      | <9℃               |
|                         | 7—8 月月平均气温( $T_{78p}$ )            | 18—25℃       | 14—18℃                      | 12—14℃                     | <12℃              |
|                         | 7—8 月平均月最高气温( $T_{78zg}$ )         | 20—30℃       | 17—20℃<br>or 30—32℃         | 15—17℃ or<br>32—35℃        | <15℃ or >35℃      |
|                         | 生育期(5—10 月)平均气温( $T_{510p}$ )      | 14—22℃       | 11—14℃                      | 9.5—11℃                    | <9.5℃             |
|                         | 7—9 月气温日温差≥10℃ 日数( $N_{79gc}$ )    | >38 d        | 30—38 d                     | 22—30 d                    | <22 d             |
|                         | 年降雨量( $P_n$ )                      | 1200—1800 mm | 800—1200 or >1800           | 500—800                    | <500              |
|                         | 6—9 月的月降雨量( $P_6, P_7, P_8, P_9$ ) | 150—200 mm   | 100—150 mm or<br>200—250 mm | 80—100 mm or<br>250—300 mm | <80 mm or >300 mm |

| 续表                           |                         |                               |                             |                             |                         |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 类型<br>Type                   | 指标<br>Factor            | 分值 Score                      |                             |                             |                         |
|                              |                         | 8                             | 6                           | 4                           | 2                       |
| 土壤要素<br>Topsoil factor       | 7—8 月平均相对湿度( $Q_{78}$ ) | 80 %—90 %                     | 75 %—80 %                   | 60 %—75 %                   | <60 %                   |
|                              | 土壤 pH( $PH$ )           | 6.5—7.2                       | 6.0—6.5                     | 5.5—6.0                     | <5.5 或>7.2              |
|                              | 土壤类型( $C$ )             | 砂壤土<br>Sandy loam soil        | 中壤土<br>Medium loam soil     | 粘壤土<br>Clay loam            | 砂质土<br>Sandy soil       |
|                              | 土壤有机质( $O$ )            | $\geq 20.0$ kg/m <sup>3</sup> | 15.0—20.0 kg/m <sup>3</sup> | 10.0—15.0 kg/m <sup>3</sup> | <10.0 kg/m <sup>3</sup> |
|                              | 耕层厚度( $H$ )             | 40—60 cm                      | >60 cm 或 30—40 cm           | 25—30 cm                    | <25 cm                  |
| 地形要素<br>Topographical factor | 坡度( $S$ )               | 3°—10°                        | 0—3°或 10°—15°               | 15°—25°                     | >25°                    |
|                              | 坡向( $A$ )               | [45,90) $\cup$ (270,315]      | [90,135) $\cup$ (225,270]   | [135,225]                   | [0,45) $\cup$ (315,360] |
|                              | 海拔( $h$ )               | 700—1000 m                    | 500—700 m<br>or 1000—1200 m | 400—500 m or<br>1200—1500 m | 400 m< or >1500 m       |

| 表 5 陕西秦岭地区魔芋潜在种植适宜性分布等级和面积                                                                                                |                           |                               |                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| Table 5 Area and potential distribution of evaluation on <i>A.ecosuitability</i> in Qinling mountains of Shaanxi province |                           |                               |                                           |
| 种植适宜区<br>Planting suitable area                                                                                           | 生态适宜性指数<br>Suitable index | 面积/(km <sup>2</sup> )<br>Area | 占可种植区面积比例/(%)<br>Proportion of plant area |
| 最适宜区 Highly suitable area                                                                                                 | 7.31—6.00                 | 1 214.42                      | 10.18                                     |
| 宜区 Moderately Suitable area                                                                                               | 6.00—5.00                 | 2 015.60                      | 16.90                                     |
| 次适宜区 Marginally suitable area                                                                                             | 5.00—4.00                 | 3 115.03                      | 26.12                                     |
| 不适宜区 Unsuitable area                                                                                                      | 4.00—2.49                 | 5 580.02                      | 46.80                                     |

陕西省秦岭地区魔芋最适宜种植面积为 1 214.42 km<sup>2</sup>,占陕西省秦岭地区可种植区面积的 10.18%,主要分布在汉中的勉县东南部、汉台区中部、城固中部、洋县中西部、宁强中部、西乡中部局地、镇巴,安康的紫阳、岚皋、石泉南部,商洛的镇安东部、山阳、柞水东部、商州中部。这些地区海拔 700—1 100 m,热量充足,年平均气温均在 14.0 ℃ 以上,年降水量为 700—1 100 mm,7—8 月平均相对湿度为 80%左右,7—8 月最高平均气温为 29.0—30.5 ℃,7—9 月气温日温差 $\geq 10$  ℃ 日数在 38 d 以上。该区域生态环境条件较优,较适于魔芋生长,也是目前陕西魔芋的主要种植区,最适宜建立规模经营的魔芋基地,应在目前种植基础上逐渐扩大规模。

陕西秦岭地区魔芋适宜种植面积有 2 015.60 km<sup>2</sup>,占可种植区面积的 16.90%,主要分布在汉中的西乡中部、汉台区大部、勉县南部、宁强大部,安康的汉滨区、汉阴、旬阳、平利,商洛的镇安大部、商州区、洛南,西安的蓝田、周至,宝鸡的眉县,渭南的华县、华阴。这些地区海拔 400—700 m 中低山区,区域土壤主要是沙壤土和砂质土,光热资源丰富,雨水较充沛,生态适宜性条件可以满足魔芋种植的要求,主要表现为绝大多数评价指标符合魔芋种植的生长条件,但有个别区划指标不符合要求,主要表现为夏季高温干旱时有发生,这些地区可作为陕西秦岭地区魔芋种植的推广发展区,建议在这些区域,一方面培育适合该区域种植的品种或改变种植条件,另一方面在专家和技术人员的指导下,有选择的种植魔芋,以增加当地农业产业发展,增加农民收入。

陕西秦岭地区魔芋次适宜种植面积为 3 115.03 km<sup>2</sup>,占可种植区面积的 26.12%,主要分布在宝鸡北部,渭南的渭城区,安康和商洛也有一部分。这些区域气候温和,降雨较多,但是雨热分布不均,不能满足魔芋整个生长期的要求,即使种植也仅是能够成活,不能促进地下块茎的生长,不推荐这些地区种植魔芋。而魔芋不适宜种植面积为 5 580.02 km<sup>2</sup>,占可种植区面积的 46.80%,主要分布在西安、渭南、咸阳和宝鸡东部等地区。这些地区为海拔 500 m 以下的平原地区,年平均气温均在 11—13 ℃,年降水量 500—650 mm,7—8 月平均相对湿度 70—75%,7—9 月气温日温差 $\geq 10$  ℃ 日数在 22—30 d,冬季和春季易发生干旱,夏季高温频繁发生,秋季连阴雨也时有发生,这些地区不宜发展魔芋产业。

### 3 讨论

#### 3.1 模型建立适用性

本文针对魔芋生长条件的要求,用 AHP 对魔芋潜在种植适宜性分布评价指标进行选择,综合考虑气候、土壤和地形要素,选择 20 个评价指标,运用 ArcGIS 软件,结合基础地理数据和土壤数据,同时考虑到无气象站观测点对潜在分布准确性的影响,对基础气象观测数据进行数字化处理,建立气象数据模型,最终生成分辨率为 100 m 的栅格数据,建立了陕西秦岭地区魔芋潜在种植分布适宜性区划模型,模拟准确达到好的程度 (RMSE 值小于 10%)。

AHP 构造的判断矩阵一致性检验结果表明,一级评价指标层和二级评价指标层中各具体参评指标对于目标层—陕西秦岭地区魔芋潜在分布区研究的相对重要性的 CR 检验显示  $CR = 0.049 < 0.1$ ,表明层次结构的判断矩阵的一致性是可以接受的。层次分析模型的构造是合理的,可以运用于魔芋潜在种植区分布。

#### 3.2 魔芋的潜在分布

植物分布的适宜生态环境首先要为植物生长提供适当的水热条件,即适当的温度和水分条件,Trisuratet 等<sup>[33]</sup>研究表明植物生境中春季和秋季的水热条件是影响其生长的主导气候因子,本文中魔芋潜在种植分布适宜性评价体系权重(表 3)表明,气候要素权重为 0.57、土壤要素权重为 0.26,地形要素权重为 0.17,说明在气候要素对魔芋种植和产量影响作用大,土壤要素次之,地形指标对于魔芋生长的作用在大尺度上有限。对于二级评价指标层,无霜期(0.0798)、年平均气温(0.0741)、土壤 pH 值(0.0728)和耕层厚度(0.0702)所占权重较大,其中无霜期决定魔芋的生长季长短,作为喜温作物,当地面温度降至 0℃或 0℃以下时,魔芋就会遭受霜冻的危害;年平均气温表征种植区的基本热量情况,在秦岭地区气温与降水密切相关,魔芋是喜温凉阴湿的物种,气温和降水是控制着其生长的主要指标。土壤酸碱度是土壤的重要的基本性质之一,在实际种植过程中魔芋必需的营养元素的有效性与土壤的 pH 值有关;耕层厚度在一定程度上决定了土壤可供养分的情况,是决定魔芋产量的重要因素。

魔芋适宜生长在温凉阴湿的环境中,对气温降水有一定要求(表 4)。春季,只要气温能够达到阈值(10℃左右),魔芋能萌芽<sup>[2]</sup>。魔芋种植最适宜的年无霜期为大于 260 d,年平均气温为 14—20℃,≥10℃积温为≥4000℃,7—8 月平均最高气温为 20—30℃。水分条件是影响魔芋潜在种植分布的另一项要素,最适宜魔芋种植的年降雨量是 1 200—1 800 mm,7—8 月平均相对湿度是 80%—90%,所占权重分别为 0.0570 和 0.0399,表明水分在魔芋生长过程中是制约其分布的指标,分布在较湿润的环境。魔芋最适宜的耕层厚度是 40—60 cm,土壤类型为沙壤土,土壤 pH 值 6.5—7.2,土壤有机质含量≥20.0 kg/m<sup>3</sup>。在相同纬度上,海拔为 700—1 000 m,坡度为 3—10°半阴坡是魔芋生长的最佳地形。

表 6 魔芋不同等级潜在种植区面积

Table 6 The areas of different levels of potential distribution of evaluation on *A. ecosuitability* in different cities

| 地区<br>Region | 面积 (km <sup>2</sup> ) 和占该地区可种植区面积比例/%<br>Area (km <sup>2</sup> ) and the ratio of the planted areas/% |                                     |                                        |                                         |                                |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|
|              | 种植区面积<br>plant area                                                                                   | 最适宜区比例<br>Highly suitable<br>area/% | 适宜区比例<br>moderately Suitable<br>area/% | 次适宜区比例<br>Marginally suitable<br>area/% | 不适宜区比例<br>Unsuitable<br>area/% |
| 汉中 Hanzhong  | 2029.90                                                                                               | 16.01                               | 17.85                                  | 27.86                                   | 38.28                          |
| 安康 Ankang    | 1933.30                                                                                               | 14.28                               | 17.42                                  | 28.38                                   | 39.92                          |
| 商洛 Shangluo  | 1315.81                                                                                               | 12.49                               | 22.70                                  | 28.40                                   | 36.41                          |
| 渭南 Weinan    | 1799.14                                                                                               | 4.13                                | 11.00                                  | 24.30                                   | 60.57                          |
| 西安 Xian      | 2280.90                                                                                               | 6.19                                | 14.23                                  | 22.37                                   | 57.21                          |
| 咸阳 Xianyang  | 864.90                                                                                                | 12.06                               | 23.64                                  | 27.36                                   | 36.94                          |
| 宝鸡 Baoji     | 1701.12                                                                                               | 7.58                                | 17.12                                  | 26.04                                   | 49.26                          |

本研究构建的模型模拟出陕西秦岭地区魔芋潜在适宜区,与调查资料结合魔芋生长的生态条件绘制的中国魔芋分布<sup>[23]</sup>基本一致(图 2 和表 5)。最适宜区和适宜区面积为 3 230.02 km<sup>2</sup>,占陕西秦岭地可种植区面积的 27.09%,主要分布在汉中、安康、商洛等地,分别为 687.36 km<sup>2</sup>、612.70 km<sup>2</sup>和 463.12 km<sup>2</sup>(表 6),这些地区是陕西魔芋种植的传统产区,因此对魔芋种植和野生资源的保护应有目的选择最适宜区或适宜区加以管理,同时注意病害对魔芋生产的影响,特别在魔芋育种选址和建设时,应充分考虑其适宜区,优选最适宜区。

#### 4 结论

本文依据生态环境数据,运用 AHP 和 ArcGIS 空间分析技术,分析了魔芋在陕西秦岭地区的潜在种植分布和主要影响指标,模拟出魔芋的潜在种植地理分布。研究结果显示魔芋在研究区适宜生长(最适宜和适宜区)的面积仅为 3 230.02 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 3.99%,其生长区域狭窄,对生态环境要求较严格。同时由于全球气候变化、受人类活动影响以及魔芋自身病害特点(自然条件下种植 1 年需停种 2—3 年的种植方式),导致魔芋的分布区面积减小,确定适宜种植区对魔芋原产地保护具有重要意义。本文综合区划的陕西秦岭地区魔芋潜在种植空间分布,为魔芋生产基地的选址和建设提供数据支撑,为宏观调控和指导魔芋的规模化种植提供参考依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 庞杰,张盛林,刘佩瑛,张兴国. 中国魔芋资源的研究. 资源科学, 2001, 23(5): 87-89.
- [2] 刘佩英. 魔芋学. 北京: 中国农业出版社, 2004: 15-22.
- [3] 白红英,马新萍,高翔,侯钦磊. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0℃等温线变化. 地理学报, 2012, 67(11): 1143-1450.
- [4] 康慕谊,朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. 生态学报, 2007, 27(7): 2274-2284.
- [5] 王昌海,温亚利,李强,胡崇德,司开创. 秦岭自然保护区群的社会效益计量研究. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(7): 113-121.
- [6] 牛义,张盛林,王志敏,李川,孙远航. 中国魔芋资源的研究与利用. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(5): 634-638.
- [7] 宣慢. 魔芋种质资源形态多样性与 ISSR 分析 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2011: 1-17.
- [8] 任盘宇,潘明清. 云南南部 5 种魔芋属植物居群遗传结构的 ISSR 分析. 武汉大学学报: 理学版, 2013, 59(1): 99-104.
- [9] 牛义,张大学,刘海利,王启军,刘红艳,张盛林. 魔芋新品种渝魔 1 号的选育. 中国蔬菜, 2010, (2): 88-90.
- [10] 张红骥,邵梅,杜鹏,卢俊,何霞红,于德才,朱有勇. 云南省魔芋与玉米多样性栽培控制魔芋软腐病. 生态学杂志, 2012, 31(2): 332-336.
- [11] 雷珍珍,叶晶龙,程海丽,陈云,望慧星,许克静,乐超银. 花魔芋抗软腐病植株的鉴定及其抗性机理的初步研究. 植物学报, 2013, 48(3): 295-302.
- [12] 何斐,段佳丽,罗宝芳,张忠良,刘列平,张小明,薛泉宏. 岚皋魔芋软腐病病原细菌生物多样性研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 91-98.
- [13] 刘艳,郭华春,张雅琼,李婉琳. 魔芋与玉米间作群体中魔芋植株生长及葡甘聚糖含量变化的研究. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1120-1125.
- [14] 彭述辉,庞杰. 魔芋葡甘聚糖在环保、医药及食品中的应用. 长江蔬菜, 2006, (12): 30-33.
- [15] Kraemer W J, Vingren J L, Silvestre R, Spiering B A, Hatfield D L, Ho J Y, Fragala M S, Maresh C M, Volek J S. Effect of adding exercise to a diet containing glucomannan. Metabolism Clinical and Experimental, 2007, 56(8): 1149-1158.
- [16] Keithley J, Swanson B. Glucomannan and obesity: a critical review. Alternatives Therapies in Health and Medicine, 2005, 11(6): 30-34.
- [17] Alonso S M, Teijeiro O D, Remunán L C, Alonso M J. Glucomannan, a promising polysaccharide for biopharmaceutical purposes. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2009, 72(2): 453-462.
- [18] Onishi N, Kawamoto S, Ueda K, Yamanaka Y, Katayama A, Suzuki H, Aki T, Hashimoto K, Hide M, Ono K. Dietary pulverized konjac glucomannan prevents the development of allergic rhinitis-like symptoms and IgE response in mice, Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2007, 71(10): 2551-2556.
- [19] 谢松峰,崔鸣. 陕南贫困山区魔芋产业发展现状和问题及对策建议. 农业现代化研究, 2012, 33(6): 270-278.
- [20] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [21] 陈海生,刘国顺,刘大双,陈伟强. 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, 2009, 42(7): 2425-2433.
- [22] 王青,戴思兰,何晶,季玉山,王朔. 灰色关联法和层次分析法在盆栽多头小菊株系选择中的应用. 中国农业科学, 2012, 45(17):

3653-3660.

- [23] 翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 严昌荣, 梁瑜珊. 基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价. 生态学报, 2012, 32(3): 931-941.
- [24] 童碧庆, 吴俊铭. 贵州山地气候条件对魔芋生长的影响及种植区划. 中国农业气象, 2004, 25(4): 35-38.
- [25] 朱伯华, 杨玲, 谢国生, 李晏斌, 周洪彪, 费甫华. 湖北省魔芋种植区划的系统分析. 湖北农业科学, 2005, (3): 11-14.
- [26] 杨代明, 刘佩瑛. 中国魔芋种植区划. 西南农业大学学报: 自然科学版, 1990, 12(1): 1-7.
- [27] Lu C Y, Gu W, Dai A H, Wei H Y. Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: a case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. In Qinling Mountains, China. Ecological Modelling, 2012, 242: 105-115.
- [28] 朱义, 张盛林. 魔芋防病与高效栽培技术. 武汉: 中国三峡出版社, 2008: 13-30.
- [29] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 何奇瑾, 李荣平. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值. 生态学报, 2013, 33(1): 103-109.
- [30] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用. 南京: 南京大学出版社, 1996: 87-103.
- [31] 沈汉, 邹国元. 菜地土壤评价中参评因素的选定与分级指标的划分. 土壤通报, 2004, 35(5): 553-557.
- [32] 郭彦龙, 顾蔚, 路春燕, 卫海燕. 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, 2013, 48(4): 411-422.
- [33] Trisurat Y, Shrestha R P, Kjergren R. Plant species vulnerability to climate change in Peninsular Thailand. Applied Geography, 2011, 31(3): 1106-1114.