

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.021

洪云鹏, 陈沂岭, 苏燕燕, 等. 宁夏枸杞种植适宜性区划. 土壤, 2024, 56(5): 1091–1100.

宁夏枸杞种植适宜性区划^①

洪云鹏^{1,2}, 陈沂岭³, 苏燕燕³, 董刚强³, 宋效东¹, 王 涵⁴, 杨金玲¹, 张甘霖^{1,2*}

(1 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 安利(中国)植物研发中心有限公司, 江苏无锡 214115; 4 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要: 于 2023 年 7—8 月对宁夏全境枸杞种植分布情况进行调查, 记录了 186 个点位的枸杞适宜种植情况, 测试了 70 份鲜枸杞样品, 获取了可溶性固形物含量、百粒重、产量和果形指数的数据, 同时收集了宁夏自治区的气候、地形、土壤等多种高分辨率环境变量。首先, 基于枸杞种植分布信息与环境变量, 使用最大熵模型(MaxEnt)识别了宁夏自治区可以种植枸杞的区域; 其次, 基于主观权重法建立了 4 项枸杞质量指标的权重和分级体系, 使用随机森林(RF)分类模型完成了宁夏自治区枸杞种植适宜性区划, 并使用相关性分析和主成分分析研究了各种环境因子对枸杞质量指标的影响。研究表明, 枸杞潜在种植区主要分布在现有农田区(除南部六盘山两侧冷凉区)和农田与牧场交界边缘区, 其中, 适宜区占 47%, 较适宜区占 35%, 次适宜区占 18%。气候因素是影响枸杞种植的主要因子, 其次是土壤和地形因素; 4 项枸杞质量指标中, 可溶性固形物含量、百粒重、果形指数主要由气候因素驱动, 产量主要受土壤肥力影响。该研究对宁夏枸杞产业转型及种植发展规划具有参考意义。

关键词: 枸杞; 种植适宜性; 最大熵模型; 随机森林

中图分类号: S567.1; S663.9 **文献标志码:** A

Suitability Regionalization for *Lycium barbarum* Cultivation in Ningxia

HONG Yunpeng^{1,2}, CHEN Yiling³, SU Yanyan³, DONG Gangqiang³, SONG Xiaodong¹, WANG Han⁴, YANG Jinling¹, ZHANG Ganlin^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Amway (China) Botanical R&D Centre, Wuxi, Jiangsu 214115, China; 4 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: A comprehensive survey was conducted during July and August in 2023 across Ningxia (NX) to assess the growth suitability of wolfberry, the information of suitability for wolfberry were recorded at 186 sites, of which 70 samples of fresh wolfberry fruit were tested for soluble solid content hundred-grain weight, yield and fruit shape index. High-resolution environmental variables including climate, topography and soil properties were collected. Firstly, MaxEnt model was employed to predict the potential cultivation areas for wolfberry by incorporating the cultivation distribution information and environmental variables. Secondly, based on the subjective weight method, weighting and grading systems for four quality indicators of wolfberry were established, and incorporating environmental variables and random forest (RF) classification model, a suitability zoning of wolfberry cultivation in NX was obtained. The impacts of environmental factors on wolfberry quality indicators were further analyzed using correlation analysis and principal component analysis. The results showed that the potential cultivation areas for wolfberry in NX were mainly distributed in current farmland regions (excluding the cold zones in the southern Liupan Mountains) and at the marginal areas of farmlands and pastures, among which 47%, 35% and 18% belonged to most-, moderate- and less- suitable. Climates acted as the most important factors for wolfberry cultivation, followed by soil and terrain properties. Among the four quality indicators, soluble solid content, hundred-grain weight and fruit shape index were significantly affected by climate, while yield was more influenced by soil fertility. This study provides guidance for the transformation of the wolfberry industry in NX.

Key words: Wolfberry; Cultivation suitability; Maximum entropy model; Random forest

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42322102, 42130715)和中国科学院青年创新促进会项目(2021310)资助。

* 通讯作者(gzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 洪云鹏(1998—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为特色农产品产地评价。E-mail: hongyunpeng@issas.ac.cn

枸杞子是重要的中草药和保健产品,具有滋补肝肾、益精明目的功效,市场需求量大^[1]。宁夏是枸杞的道地产区,自古就有枸杞种植^[2]。枸杞属于经济作物,种植枸杞收益高,但也存在风险高、成本大的问题,选地与管理直接影响枸杞的产量和品质^[3]。近年来,宁夏枸杞产业布局发生巨大变化,一方面,枸杞消费市场快速扩张,为宁夏产区提供了更多发展机会^[4];另一方面,青海、甘肃等枸杞产区迅速兴起,挤压了宁夏枸杞市场份额;同时,“不与粮争地”的农业政策促使许多优质枸杞田转向粮食生产,这促成了宁夏“枸杞上山”的产业发展新布局^[5]。面对这些变化,有必要开展新的、科学的枸杞种植适宜性区划。

枸杞的环境适应性强,在我国大部分地区都可见野生枸杞^[6]。从种植上看,种植区主要分布在温带和高原温带的半干旱区,包括宁夏、内蒙、甘肃、青海、新疆等省区^[7]。枸杞喜温凉、长光照、干燥的环境,且枸杞耐盐碱^[8]。枸杞在用途上分为食用和药用^[1,9],当前枸杞市场需求的增长主要体现在保健、食用方面,如枸杞鲜果、枸杞原浆、枸杞酒等。枸杞的内在指标包括总糖、多糖、甜菜碱、可溶性固形物等;其外观品质指标最常用的有百粒重、纵径、横径、果形指数、坏果率、色泽等^[10]。

目前枸杞适宜性区划的研究主要考虑气候因素,且在评估产地优劣时常仅依靠产量作为衡量标准。如周仲显^[11]根据枸杞生育期统计资料,基于 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温和年均温将宁夏划为适宜区、可种植区以及不可种植区;苏占胜等^[12]量化了气候因素与产量的关系,并以相关系数为权重,完成了宁夏枸杞气候 3 级区划;马力文等^[13]选取并建立了 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温等多项气候指标的适宜性分级体系,完成了宁夏地区枸杞 4 级气候区划。在大尺度上,气候区划具有重要意义,但在小范围内,气候因素的影响不明显,土壤和地形可能更加关键。因此,仅仅基于气象指标既难以准确识别出适宜区边界,更无法准确划分适宜区内的适宜性程度。

近年来,物种分布模型被广泛用于预测物种适宜性分布,其基本原理是基于物种分布点信息及其所关联的气候、土壤、地形等环境信息,根据环境相似度原理,预测物种潜在的分布范围^[14-15]。最大熵值模型(MaxEnt)是较常用的物种分布模型,如王汉卿等^[16]借助 MaxEnt 模型完成了全国枸杞子生产区划;孙莉等^[17]借助 MaxEnt 模型完成了全国枸杞生长适宜性区划;李静等^[15]借助 MaxEnt 模型模拟了全国枸杞生态适宜性分布概率图。MaxEnt 模型不需要太多先验知

识,它充分利用各种环境变量,可快速获取与已知点环境相似的其他区域,能比较准确地识别适宜区范围;它的局限性是把已知分布点看作整体,无法区分其内部的差异,即只能预测适宜区范围,而难以反映适宜区内的适宜性程度。

万物所生皆有其境,产地环境决定了产品质量,而产品质量也能反映产地的适宜性。适宜区内的枸杞种植适宜性程度可以通过枸杞的综合质量来反映,例如张晓煜等^[10]、张波等^[18]、林楠等^[19]就通过建立枸杞质量综合评价体系,进而获得了不同产地等级。随机森林模型(RF)具有高预测准确率,可用于执行分类和回归任务^[20],在二分类和多分类任务中都有广泛应用^[21-22]。RF 模型虽然在枸杞种植区划方面的研究较少,但基于已建立的质量评价体系,将已分级的采样点数据划分为训练集和验证集,借助分类模型和环境变量可完成区域内枸杞适宜种植等级预测。

宁夏是我国的枸杞产销中心,枸杞产业转型需要科学的种植区划做指导,但至今仍缺乏比较精细的,考虑气候、土壤、地形和枸杞品质等综合因素的枸杞种植适宜性区划图。本研究基于宁夏全境的枸杞产地采样调查,获取了详细的宁夏枸杞种植分布情况,收集了多个高分辨率环境变量,借助 MaxEnt 模型识别宁夏自治区枸杞潜在种植区;基于枸杞鲜果多指标测试,建立指标权重和分级体系;最后借助 RF 分类模型,对宁夏自治区进行精细的枸杞种植适宜性等级区划,以期对宁夏枸杞产业转型和科学种植规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏位于我国西北部($35^{\circ}14'\text{N} \sim 39^{\circ}23'\text{N}$ 、 $104^{\circ}17'\text{E} \sim 107^{\circ}39'\text{E}$),总面积为 6.64 万 km^2 。地处黄河中上游,是黄土高原向内蒙古高原过渡区域,地貌复杂,地势南高北低,由南向北依次为山地、黄土丘陵、缓坡丘陵和黄河冲积平原。全区气候干旱,农业以灌溉为主,主要农业区分布在黄河及其支流的两岸,平均海拔 1 560 m,气候温凉、光照充足,适合枸杞种植^[23]。据相关报道,宁夏全自治区枸杞保有面积 2.53 万 hm^2 (2022 年),其中,中宁县被称为“中国枸杞之乡”,是国际枸杞交易中心。

1.2 采样和测试

采样工作开展于 2023 年 7—8 月,正值枸杞夏果采收期。在野外采样调查前,结合往年枸杞核心种植区分布、土壤类型分布、地形分布以及卫星遥感影像

等数据预设采样点位。实地调查时根据实际情况进行调整,对宁夏全境各区县枸杞生长情况进行调查,共记录 186 个点位信息(图 1)。其中,现有枸杞种植或曾有枸杞种植历史的点位 133 个(枸杞鲜果采集测试样点 70 个),无枸杞种植历史或枸杞无法种植的点位 53 个。基于野外工作的实验条件和前人文献的记载^[10],以鲜枸杞的可溶性固形物含量、百粒重、果形指数和干枸杞产量 4 项常见指标作为评价指标。使用速测仪器,测试了 70 份枸杞鲜果样品的可溶性固形物、百粒重、纵径和横径,并统计当季产量、品种、种植年份等信息。

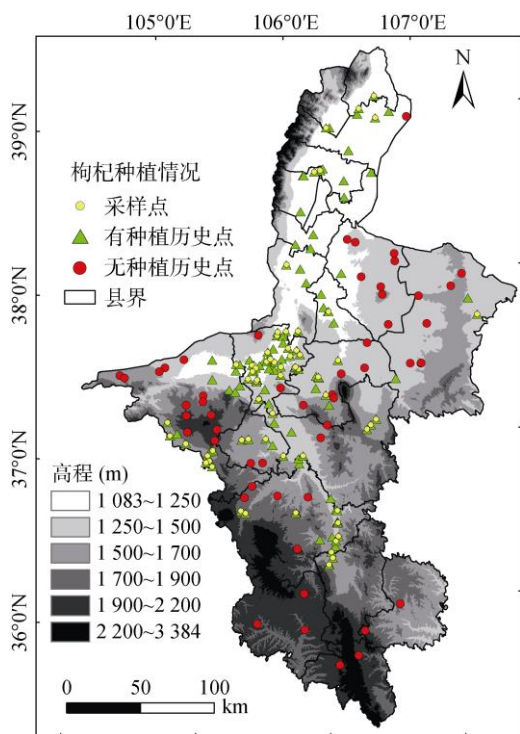


图 1 宁夏枸杞种植调查记录点分布

Fig. 1 Distribution of survey sites of wolfberry cultivation in Ningxia

70 份鲜枸杞的可溶性固形物使用 ATAGO 品牌的 PAL-1 型折射仪测试,糖度(Brix)精度为 0.1%,重复 3 次(NY/T 2637—2014)^[24];百粒重测试使用精度为 0.01 g 的普通电子天平,3 次重复测量取平均值;纵径和横径测试使用精度为 1 mm 的标尺,均重复 10 次取平均值;采摘的样品在当天晚上集中完成测试。产量来源于实地调查数据,考虑到未成年枸杞树(<5 a,本研究中占 40%)的树龄对产量影响较大,本研究对树龄和产量作回归分析发现,产量随树龄增加基本呈幂函数增长,据此对部分产量调查结果进行校正。

1.3 环境变量处理

本文应用的环境变量包括气候($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、

年均温、年日照时长、年太阳辐射总量、干旱指数、年降雨量、年平均风速、采收季降雨量、采收季均温等)、土壤(全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、游离铁、碳酸钙含量、pH、容重、砾石含量、黏粒含量等)和地形(高程、坡度、坡向、地形湿度指数、剖面曲率等)^[25-26]。其他数据包括 2015 年 1:100 万基础地理信息数据和 2021 年土地利用数据(30 m \times 30 m)^[27],其中土壤数据分辨率为 90 m \times 90 m,其他环境变量分辨率为 1 km \times 1 km。使用双线性插值将所有环境变量重采样到 90 m 分辨率。环境变量间的共线性会影响模型精度,因此分别对气候、土壤以及地形 3 个变量按照相关系数绝对值 0.9 的倍数关系进行变量筛选^[28]。以上所有操作均在 R 语言中完成。

1.4 指标权重和分级体系

适宜性评价的基本过程包括评价指标选择、指标权重确定、指标分级、综合得分和综合等级划分^[29]。指标权重的研究方法包括主观权重法和客观权重法,本文使用实践经验和专家知识的主观权重法;参考鲜枸杞分级标准 GH/T 1302—2020^[30],结合层次聚类方法对 4 个枸杞质量指标进行了指标分级,将各指标分成 4 级或 5 级,并用对应数字表达;使用累加法计算加权综合得分;对综合得分进行层次聚类方法划分等级,并根据实际指标等级对综合等级进行调整,最终将枸杞种植适宜性等级划分成适宜、较适宜、次适宜共 3 个等级。

1.5 构建预测模型

最大熵模型(MaxEnt)被广泛应用于物种分布研究,其基本思想是在不确定性最大的情况下,选择概率分布最均匀的模型。Maxent 软件(https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)提供了友好的用户界面,操作简易。借助 MaxEnt 模型分析宁夏 133 个枸杞种植点,在环境变量的协助下,获得枸杞分布概率,再根据推荐分类阈值,划分出宁夏枸杞潜在种植区。

随机森林(RF)是一种基于分类树的、有监督的机器学习算法,采用 Bagging 的思想,集成多个弱分类器,利用投票方式获得最终分类或回归结果^[31]。大量研究^[32-33]表明,RF 具有极佳的分类预测性能。基于已经获取的枸杞潜在种植区,结合各采样点枸杞种植适宜性等级,借助利用 RF 分类模型完成宁夏自治区枸杞种植适宜性区划。

综合来说,本研究分两部分进行,第一步,识别宁夏的枸杞潜在种植区;第二步,完成潜在种植区内枸杞的种植适宜性分区(图 2)。

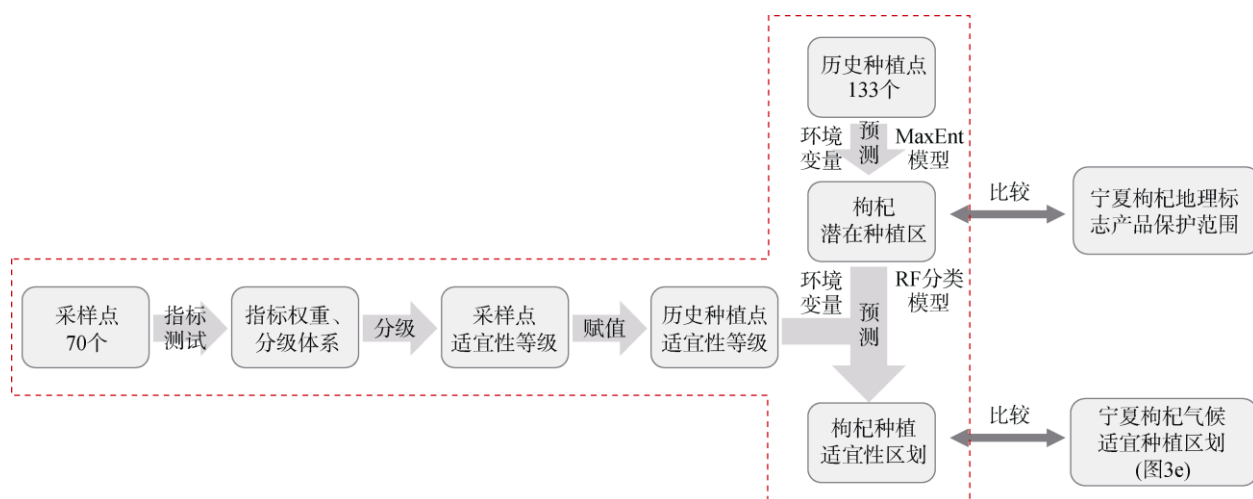


图 2 研究基本流程图
Fig. 2 Basic flow chart of study

2 结果与分析

2.1 宁夏自治区枸杞潜在种植区

本研究原计划借助前人在气候区划上的成果^[3,12-13],使用 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温(图 3A)、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 累计日数(图 3B)的枸杞气候适宜性分级标准,进行图层叠加,获取宁夏枸杞潜在种植区,但是本次实地采样调查发现(图 1),仅依靠原有气候区划难以准确识别,例如宁夏东部(灵武市、盐池县)干旱草原地区并不适合枸杞种植。鉴于气候区划的缺陷性,本研究综合枸杞种植信息和气候、土壤、地形等多种环境变量,使用 Maxent 模型识别枸杞潜在种植区(图 3C),再结合现有土地利用(图 3D)进行矫正。

MaxEnt 模型预测结果表现为 0~1 连续分布,选择 0.083 作为阈值(Balance training omission, predicted area and threshold value)进行二分类。模型精度评估采用 ROC 曲线下面积(AUC)作为指标,结合 10 折交叉验证,最终模型在训练集上的平均 AUC 达到了 0.94,在测试集上的平均 AUC 为 0.88,表明模型精度较高。

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 累计日数图层叠加后,枸杞气候适宜种植区面积约占宁夏总面积的 68%;MaxEnt 模型识别的枸杞潜在种植区面积约占宁夏的 39%,前者面积大于后者,后者几乎都在前者范围内。将 MaxEnt 模型识别的枸杞潜在种植区与国家标准 GB/T 19742—2008^[34]中划定的宁夏枸杞地理标志产品保护范围比较(图 3F,阴影部分)发现,二者在黄河灌区的范围基本一致,但前者的南界更远,到达了固原市原州区范围(与实地调查相符),而后者仅划分到同心县中部。将 MaxEnt 模型识别的枸杞潜在

种植区与宁夏近年土地利用情况比较发现,除南部六盘山冷湿区外,枸杞潜在种植区范围包括了现有农田区及农田与牧场交界边缘区。矫正后(删除居住区部分)枸杞潜在种植区约占宁夏总面积的 37%,裁切气候区划图,获得了改进的枸杞种植气候区划(图 3E),其中适宜区占 72%,较适宜区占 16%,次适宜区占 12%。

2.2 宁夏枸杞种植适宜性评价

2.2.1 枸杞质量指标统计分析 从变异系数看(表 1),百粒重变异系数最大,果形指数变异系数最小;从偏度看,除产量表现为负偏态(偏度小于 0)外,其他均表现为正偏态,其中可溶性固形物的偏度最大,百粒重偏度最小;从峰度看,与正态分布峰度比较,可溶性固形物表现为明显正峰态,其次是果形指数,百粒重的峰度最接近正态分布。枸杞可溶性固形物的平均值为 21.9%,按照 GH/T 1302—2020 中的鲜果等级划分标准^[30],所有采样点枸杞的可溶性固形物均达到特等水平($\geq 15\%$);百粒重平均值为 86.6 g,与上述标准比较,超过 1/2 样点的枸杞鲜果百粒重达到特等水平($\geq 80\text{ g}$)。

枸杞可溶性固形物与百粒重、产量、果形指数均呈负相关,其中,与产量、果形指数均达到显著水平(表 2);说明果实大、形态好、产量高的枸杞的内在品质不一定高。百粒重、产量、果形指数彼此呈正相关,意味着随果实形态变长,百粒重和产量可能会增加。

2.2.2 枸杞质量指标品质分级 参考上述鲜枸杞分级标准,结合层次聚类方法对 4 个枸杞质量指标进行了等级划分,图 4 展示了 70 个枸杞采样点 4 个指标的等级分布情况。

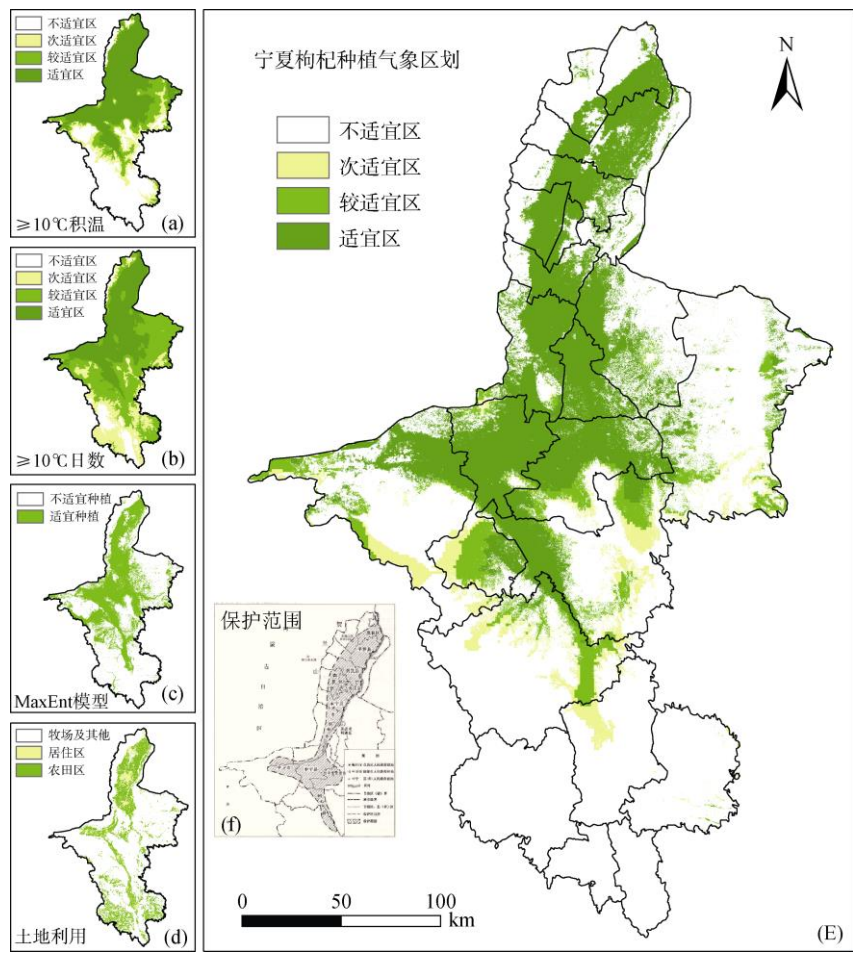


图 3 宁夏枸杞潜在种植区的气候适宜性区划

Fig. 3 Climatic suitability zoning of wolfberry in potential cultivation areas of Ningxia

表 1 70 个采样点枸杞质量指标统计描述

Table 1 Statistics of wolfberry quality indicators of 70 samples

指标	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	变异系数	偏度	峰度
可溶性固形物(%)	17.2	32.6	21.9 ± 3.3	15.2	1.4	2.8
百粒重(g)	26.0	160.9	86.6 ± 29.4	34.0	0.3	-0.1
产量(kg/hm ²)	808.0	4 381.0	3 248.0 ± 699.7	21.5	-0.9	1.3
果形指数	1.6	2.9	2.0 ± 0.2	12.3	1.2	2.2

表 2 枸杞质量指标间的相关性

Table 2 Correlations among wolfberry quality indicators

	可溶性固形物	百粒重	产量
百粒重	-0.16		
产量	-0.24*	0.23	
果形指数	-0.40**	0.31**	0.18

注：*、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平，下同。

枸杞鲜果可溶性固形物反映果实的口感和营养价值，一般认为其含量越高越好；枸杞可溶性固形物较高的区域是黄河沿岸的卫宁平原和银川平原枸杞产区，较低的区域是南部的同心、海原、固原等枸杞产区。百粒重反映果实大小和饱满程度，百粒重越大，

品质越好；虽然百粒重受枸杞品种影响较大^[35]，但总体上看，宁南枸杞产区的百粒重相对较高。产量是枸杞质量品质的综合体现，通常产量越高，综合质量越好；黄河两岸灌区和宁夏西部靠近靖远县的兴仁镇及周边地区产量较高，南部枸杞产区的产量居中等偏下，而产量最低的点位基本都分布在中宁县周边的低丘岗地上，实地调查发现，这主要是因为“枸杞上山”工程新开垦的种植田，环境条件较差。果形指数大的枸杞商品品质好，果形指数在空间上表现出明显的规律性，由北向南果形指数逐渐增大，卫宁平原和银川平原枸杞产区果形指数较小，兴仁镇及周边地区、宁南海原、同心、固原等枸杞产区的果形指数最大。

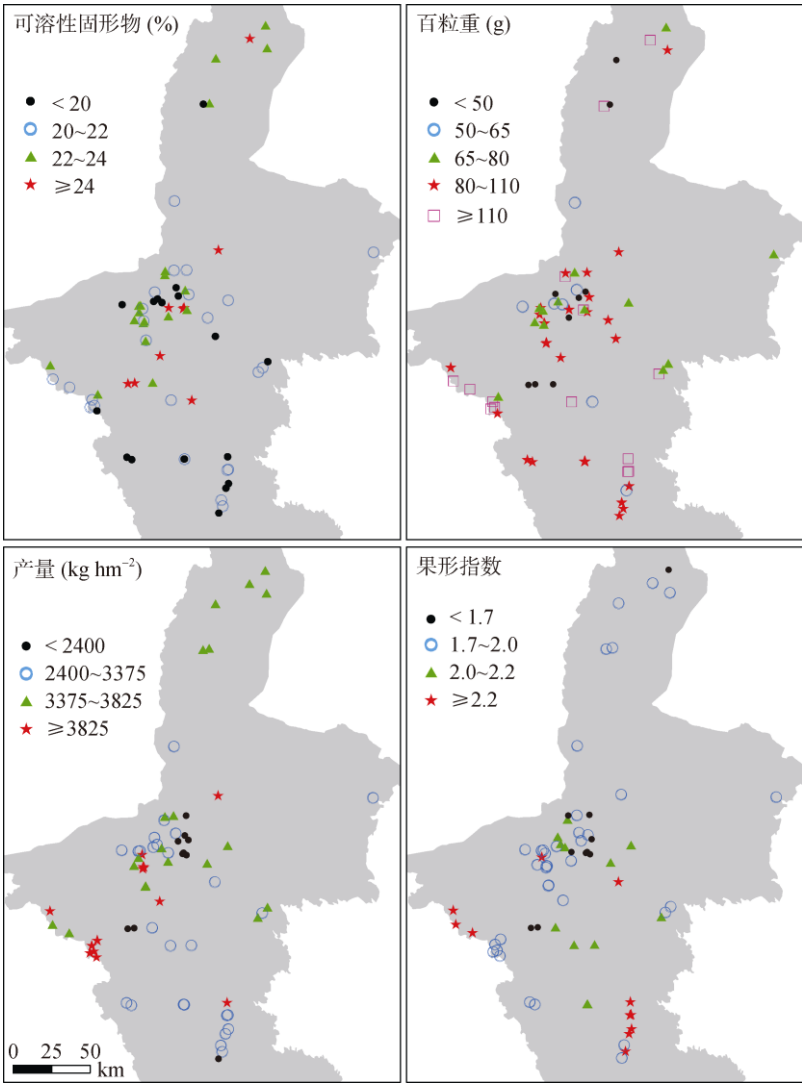


图 4 枸杞质量指标分级
Fig. 4 Grades of wolfberry quality indicators

2.2.3 枸杞质量指标与环境因子的关系 为探索环境变量对枸杞质量指标的影响,对所有环境变量进行主成分分析,提取了特征值>1 的 5 个主成分,它们的累计方差贡献率为 80%。主成分是原始变量的线性组合,原始变量的系数越大,主成分对其指示性越强。总结发现,主成分 1 的方差解释率为 42%,主要表征气候因素;主成分 2 的方差解释率为 21%,主要表征土壤因素;主成分 3 的方差解释率为 8%,表征气候、土壤、地形等综合因素。进一步建立了各主成分与枸杞质量指标的相关关系(表 3),枸杞的可溶性固形物含量受综合因素影响,其中气候、土壤因素可能影响较大;百粒重主要受气候因素影响;产量也受综合因素影响,其中土壤因素影响最大;果形指数受综合因素影响,其中气候、土壤因素影响较大,但与可溶性固形物受到的影响可能相反。

表 3 环境变量主成分与枸杞质量指标的相关性
Table 3 Correlations between principal components of environmental variables and wolfberry quality indicators

	可溶性固形物	百粒重	产量	果形指数
主成分 1	0.23	-0.30*	0.00	-0.32**
主成分 2	-0.20	0.06	0.23	0.27*
主成分 3	0.29*	0.03	0.27*	-0.30*
主成分 4	0.02	0.02	-0.13	0.04
主成分 5	-0.20	0.14	0.16	0.17

为进一步理解 4 个枸杞质量指标与环境变量的关系,选择对上述主成分贡献较大的气候、土壤、地形因子,建立与枸杞质量指标的相关关系矩阵(图 5)。气候因素中,枸杞可溶性固形物与日照时长、温度因素、干旱指数呈显著正相关,与降雨量呈显著负相关;土壤因素中,枸杞可溶性固形物与表层土壤全钾含量、容重呈显著正相关,与游离铁含量呈显著负相关;地形因素中,

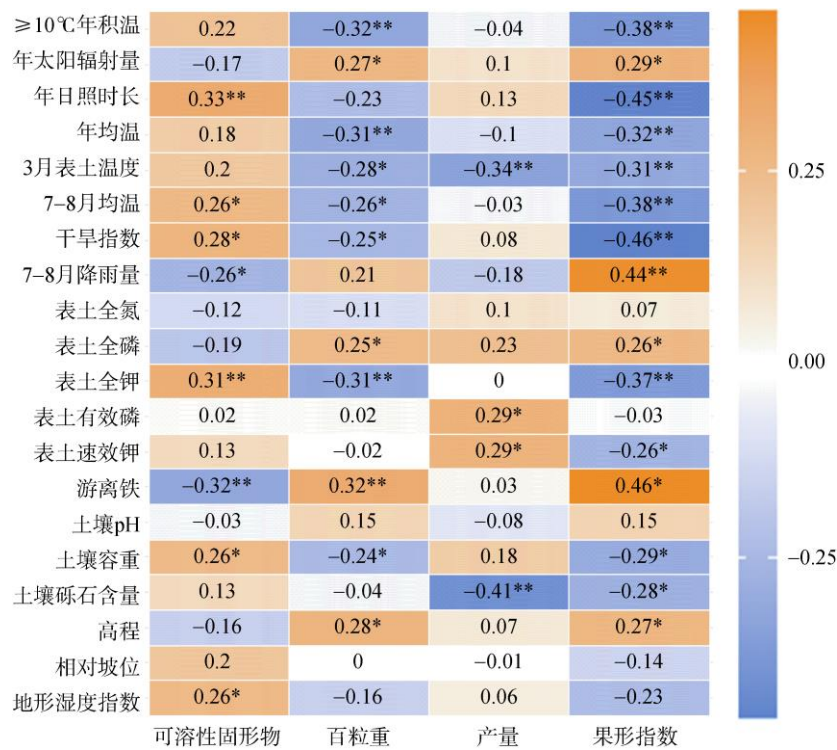


图 5 枸杞质量指标与主要环境变量的相关性
Fig. 5 Correlations between wolfberry quality indicators and key environmental variables

可溶性固形物与地形湿度指数呈显著正相关。鲜果百粒重对环境的响应几乎与枸杞可溶性固形物相反，因为温度高会加快枸杞的成熟^[7]，使百粒重减小，这同样会影响到果形指数。产量主要受土壤因素的影响，与有效磷、速效钾呈显著正相关，与土壤砾石含量呈显著负相关。气候因素中，温度高、降雨多均不利于产量形成。果形指数对环境变量的响应与百粒重几乎一致，但果形指数表现得更为敏感，与环境变量相关性更强。

2.2.4 枸杞综合指标分级 对枸杞质量指标进行等级划分后(表 4)，为统一量纲，将相应等级转换成 1 ~ 5 的数值；再根据实践经验和专家知识给每个枸杞质量指标分配权重。首先，将质量指标分为产量和品质两类，在调研中，种植户普遍认为二者重要性为 1:1，而枸杞种植加工企业、政府人员、枸杞培育和研究者认为二者重要性为 3:7，综合考虑，将产量和品质权重关系定为 4:6；品质指标中，根据郭小芹和王宇春^[36]研究，枸杞可溶性固形物、百粒重、纵径、横径的权重几乎相同。因此，确定了 4 个指标的权重，枸杞可溶性固形物、百粒重、果形指数的权重均为 20%，产量的权重为 40%。使用累加法计算采样测试点位的综合得分，对综合得分再次进行等级划分，获得 70 个点位的适宜性等级；再根据 70 个测试点的枸杞种植适宜性等级，结合环境相似性分析和野外观测记录，为其他枸杞适宜种植点位赋值，最终得到 133

个点的种植适宜性等级(表 4)，分为适宜、较适宜、次适宜。

表 4 133 个枸杞点枸杞种植适宜性等级划分标准			
Table 4 Classification criteria of suitability grade for wolfberry cultivation across 133 points			
综合等级	加权得分	指标等级	点位数
适宜	≥2.8 或 ≥3.2	至少 3 个指标等级 ≥3	67
较适宜	2.2 ~ 2.8	至少 3 个指标等级 ≥2	50
次适宜	<2.2	至少 2 个指标等级为 1	16

2.3 枸杞种植适宜性综合区划

在枸杞潜在种植区范围内，使用 RF 构建分类预测模型，使用 10 折交叉验证、重复 5 次检验模型精度，结果显示 OBB 误差为 21%，交叉验证结果显示 Accuracy 为 0.77，Kappa 系数为 0.66，说明模型拟合较好。

如图 6 所示，从分布上看，枸杞适宜区主要分布在黄灌区，其次是中宁县到同心县之间的狭长谷地以及宁夏西部与甘肃省靖远县接壤的兴仁镇及周边区域；较适宜区分布范围广，如北部的贺兰山山麓地带、黄河低阶地上、东部干旱低丘区，南部黄土丘陵区均有分布；次适宜区主要分布在卫宁平原附近的低丘岗地上。从分布面积上看，适宜区面积最大，占枸杞潜在种植区面积的 47%，较适宜区占 35%，次适宜区

面积最小, 占 18%。

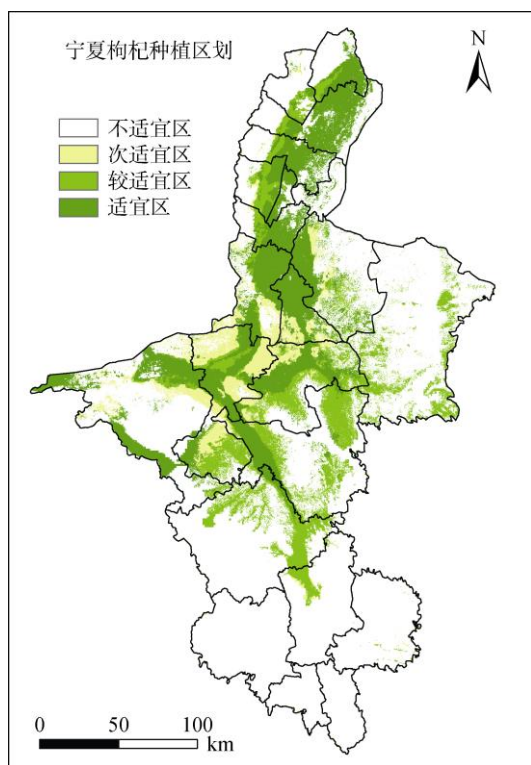


图 6 枸杞种植适宜性综合区划图

Fig. 6 Comprehensive zoning map of wolfberry cultivation suitability

3 讨论

3.1 枸杞气候区划与综合区划比较

从空间上看,枸杞气候区划的种植适宜性程度具有明显规律性,大致呈环状,最外围为不适宜区,向内逐渐过渡到次适宜区、较适宜区、适宜区;而综合区划的种植适宜性程度比气候区划表现得规律性弱。这可能是因为不同尺度上,气候、地形、土壤等因素对种植适宜性影响程度不同。在自治区尺度上,气候(表 3,主成分 1)起到决定性作用,解释了 42% 的变异;在较小尺度上,地形强烈影响枸杞种植的适宜性;在田间尺度,还可能受到土壤肥力、人为管理等多方面的影响。

从各适宜等级分布上看,对于适宜区,气候区划与枸杞综合区划的大体范围差异不大,但在宁夏平原灌区周围低丘岗地上,气候没有较大程度变化,仍属于气候适宜区,但是由于该区地形起伏大、土壤砾石含量高、肥力低,从综合区划上看,属于次适宜区,也是近年来“枸杞上山”工程的主要拓展区。对于较适宜区,综合区划的占比较大,形成原因更复杂,主要分 3 类,第一类是强烈盐渍化区,如黄河低阶地和贺兰山山麓地带,地下水位高,盐渍化严重;第二类

是干旱丘陵区,如海原县北部、同心县东部、盐池县东部等,限制因子是干旱缺水;第三类是冷凉区,主要是固原市北部与同心、海原县交界地带,积温较低,降水较多,产量不高。对于次适宜区,气候区划主要划出的是年积温偏低、日照较少、降雨较多的区域,而在综合区划中,主要分布在适宜气候区内的局部地形起伏较大,土层浅、砾石含量高、土壤肥力较低的区域。

3.2 模型适用性与误差分析

本研究在空间预测上分两步,使用了两种模型,第一步,应用 MaxEnt 模型预测枸杞潜在种植区;第二步,应用 RF 分类模型预测枸杞种植适宜性等级区划图。两者均使用 10 折交叉验证,MaxEnt 模型的稳定性和预测精度均较好,说明模型适用性强。RF 模型的稳定性较好,预测精度相对较低,这可能是由于输入数据存在较大误差,例如数据收集年份只有一年,不同枸杞品种可能会引入误差等。同时需要指出,受尺度效应的影响,本研究中构建的枸杞质量评价体系是基于“宁夏产区”所制定的,如果将其拓展应用到全国范围,可能是不适用的。

3.3 枸杞质量指标的环境响应及分析

从主成分分析可知,在自治区尺度上,气候对枸杞生长起决定性作用。4 个质量指标中,除产量外,枸杞可溶性固形物、百粒重、果形指数均对气候响应强烈,其中,果形指数敏感性最高。枸杞可溶性固形物属于内在品质,温暖干燥的环境有利于可溶性固形物增加;百粒重和果形指数属于外观品质,在温凉湿润的环境中较好。由此可见,气候因素的差异,会产生不同品质类型的枸杞。枸杞是药食两用的作物,合理规划食用、药用枸杞种植区域,有利于充分发挥区域气候优势。

土壤因素对枸杞生长也很重要,枸杞产量主要受土壤因素影响。据研究,宁夏土壤氮、磷含量低,钾素含量丰富^[37];从相关性上看,4 个枸杞质量指标均对土壤全氮含量响应小,可能是枸杞生产中氮肥施肥量较大造成的。枸杞可溶性固形物、百粒重、果形指数对全磷、全钾响应较大,对有效磷、速效钾响应较小,这说明枸杞种植的磷、钾供应较充足;但产量与有效磷、速效钾呈现显著正相关,说明想获得高产,有必要适当增加磷、钾肥的投入。实地调查发现,宁夏枸杞在施肥管理上存在“重氮轻钾”的现象,尿素一次追肥多达 0.5~1 kg/株,这常造成氮素浪费。枸杞是需磷、钾较多的作物,研究发现,多年枸杞田的土壤速效钾含量远低于一般农田^[3]。因此,本研究认

为,在当前宁夏枸杞施肥管理上,应该重视磷钾肥的投入,相应地减少氮肥用量,以提高肥料利用效率,实现收益最大化。

3.4 枸杞各级适宜区的发展潜力分析

宁夏枸杞产业正处于转型期,尤其以“中国枸杞之乡”中宁县为引领,主要表现在两个方面,一是由追求高产转向追求无公害、高品质;二是由散户分散式种植转向集约化、规模化种植。

从种植区发展潜力上看,适宜区灌溉便利,盐碱小,土壤肥沃,非常适合枸杞种植,但随着国家防止农用地“非粮化”政策的深入推进,该区域的可供枸杞种植的田块逐渐减少^[4],实地调研中也发现了该现象。较适宜区分为多种情况,一是地下水位高、盐碱重的黄河两岸的低阶地,种植枸杞效果较差,发展枸杞种植的潜力低;二是山麓地带和宁南冷凉区,枸杞品质好但产量较低,但是种植其他农作物收益更低,在政府支持、企业入驻以及科研支持下,挖掘区域特色,打造枸杞品牌,有较大的发展种植潜力;三是干旱黄土丘陵区,灌溉成本较大,但在引黄工程、节水灌溉条件下,有一定发展种植潜力。次适宜区主要分布在现有农田边缘的低丘岗地上,土壤中砾石含量较高,缺水,但这些区域发展枸杞种植的潜力和优势大:①地处非农田区,不用“与粮争地”;②土地购买成本低,可以大规模集中连片种植,利于管理;③土壤未曾被开发利用,元素均衡,虽然产量不高,但品质尚佳;④借助农田引水工程和现代农业智能化节水灌溉技术,可以实现优质枸杞生产,该模式在中宁县已经有初步发展,并取得了不错成效。

4 结论

宁夏枸杞潜在种植区占自治区总面积的37%左右,包括现有农田区(除南部六盘山区外)和农田区与牧区交界边缘区;气候是影响枸杞种植的主要因素,其次是土壤因素和地形因素。

枸杞可溶性固形物主要受气候驱动,最高的区域为中部干旱丘陵区,整体表现为北部银川平原、卫宁平原高,南部的海原县、同心县等枸杞产区低;百粒重和果形指数也主要受气候驱动,均表现为南部温凉湿润区大于北部温暖干旱区;产量主要受土壤因素影响,整体表现为黄河灌区高于其他区域。

宁夏枸杞种植的适宜性综合区划适宜区占枸杞潜在种植区面积的47%,较适宜区占35%,次适宜区占18%;从种植现状看,适宜区的枸杞种植面积在萎缩,而较适宜区和次适宜区具有较大的种植发展潜

力。目前,宁夏枸杞产业发展布局仍基于县域尺度,缺乏基于自治区尺度的整体规划,这造成各区域枸杞产业发展水平差距较大,区域优势不能充分发挥。未来宁夏枸杞种植发展规划应基于自治区尺度,发掘区域优势,因地制宜打造区域枸杞品牌,以实现宁夏自治区枸杞产业稳定高质量发展。

参考文献:

- [1] 卢有媛,郭盛,张芳,等.枸杞属药用植物资源系统利用与产业化开发[J].中国现代中药,2019,21(1):29-36.
- [2] 汪燕平.从草木到药材——清代甘肃的当归、枸杞、肉苁蓉、锁阳[D].西安:陕西师范大学,2014.
- [3] 曹有龙,何军.枸杞栽培学[M].银川:阳光出版社,2013.
- [4] 郝志红.推进宁夏现代枸杞产业高质量发展的思考与对策[J].宁夏农林科技,2022,63(S1):84-87,102.
- [5] 秦晔,贾云,段淋渊,等.要素创新 助力枸杞产业发展[J].宁夏农林科技,2019,60(9):94-95.
- [6] 董静洲,杨俊军,王瑛.我国枸杞属物种资源及国内外研究进展[J].中国中药杂志,2008,33(18):2020-2027.
- [7] 王亚军.‘宁杞1号’枸杞品质对气象和土壤因子的响应机制[D].北京:北京林业大学,2020.
- [8] 刘静,张晓煜,杨有林,等.枸杞产量与气象条件的关系研究[J].中国农业气象,2004,25(1):17-21,24.
- [9] 卢有媛,郭盛,严辉,等.生态因子与化学成分相关联的药用和食用枸杞子适宜生产区划研究[J].药学报,2020,55(10):2466-2477.
- [10] 张晓煜,刘静,王连喜.枸杞品质综合评价体系构建[J].中国农业科学,2004,37(3):416-421.
- [11] 周仲显.宁夏枸杞气候区划[J].宁夏农业科技,1984,25(1):25-28.
- [12] 苏占胜,刘静,李建萍,等.宁夏枸杞产量气候区划研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):132-135.
- [13] 马力文,叶殿秀,曹宁,等.宁夏枸杞气候区划[J].气象科学,2009,29(4):4546-4551.
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [15] 李静,余意,郭兰萍,等.枸杞子品质区划研究[J].中国中药杂志,2019,44(6):1156-1163.
- [16] 王汉卿,王庆,马玲,等.枸杞子药材生产区划研究[J].中国中药杂志,2016,41(17):3127-3131.
- [17] 孙莉,王山,王正元,等.基于最大熵模型的枸杞生态适宜区预测[J].宁夏大学学报(自然科学版),2018,39(2):143-147.
- [18] 张波,罗青,王学琴,等.不同产区宁夏枸杞品质分析比较[J].北方园艺,2014(15):165-168.
- [19] 林楠,杨宗学,蔺海明,等.不同产地枸杞质量的比较研究[J].甘肃农业大学学报,2013,48(2):34-39.
- [20] 卢宏亮,赵明松,刘斌寅,等.基于随机森林模型的安徽省土壤属性空间分布预测[J].土壤,2019,51(3):602-608.
- [21] 王丽,周勇,李晴,等.基于随机森林的耕地质量评价智能模型及其应用研究[J].土壤学报,2022,59(5):

- 1279–1292.
- [22] 陈荣, 韩浩武, 傅佩红, 等. 基于多时相遥感影像和随机森林算法的土壤制图[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1087–1094.
- [23] 曲潇琳, 龙怀玉, 谢平, 等. 宁夏中部地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 75–87.
- [24] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法: NY/T 2637—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [25] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(3): 328–340.
- [26] Song X D, Wu H Y, Ju B, et al. Pedoclimatic zone-based three-dimensional soil organic carbon mapping in China[J]. Geoderma, 2020, 363: 114145.
- [27] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [28] 桑满杰, 卫海燕, 毛亚娟, 等. 基于随机森林的我国荞麦适宜种植区划及评价[J]. 山东农业科学, 2015, 47(7): 46–52.
- [29] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
- [30] 中华全国供销合作总社. 鲜枸杞: GH/T 1302—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [31] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1).
- [32] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 等. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 650–659.
- [33] 孟祥添, 鲍依临, 刘焕军, 等. 基于高分 5 号影像的东北典型黑土区土壤分类[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 231–238.
- [34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地理标志产品 宁夏枸杞: GB/T 19742—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [35] 王秀芬, 李静, 冷晓红, 等. 不同品种枸杞子外观性状对比研究[J]. 宁夏农林科技, 2017, 58(2): 31–32, 39, 69.
- [36] 郭小芹, 王宇春. 河西东部枸杞综合品质评价指标的建构[J]. 中国农学通报, 2018, 34(22): 66–71.
- [37] 宁夏农业勘查设计院编. 宁夏土壤[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1990.