

DOI: 10.5846/stxb202002110229

蔡海生, 陈艺, 张学玲. 基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法. 生态学报, 2020, 40(24): 9208-9219.

Cai H S, Chen Y, Zhang X L. Suitability evaluation and zoning method research on development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9208-9219.

基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法

蔡海生^{1,2}, 陈 艺¹, 张学玲^{1,*}

1 江西农业大学 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/江西农业大学富硒农业产业发展研究中心, 南昌 330045

2 江西旅游商贸职业学院, 南昌 330100

摘要: 实施乡村振兴战略, 产业兴旺是关键。立足区域富硒土壤资源禀赋优势, 发展富硒农业特色经济, 是振兴乡村产业的一条有效途径。以多维超体积生态位理论为指导, 以区域富硒土壤资源禀赋和富硒农业发展要求为基础, 从土壤自身条件、土地利用和生态保护 3 个方面明确了富硒土壤资源开发利用的主导因素、区位因素、限制因素; 选择土壤硒含量、土壤有机质含量、地形坡度、土地利用类型、土地综合污染指数、生态保护建设等 6 个关键因子, 构建了富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价指标体系; 利用生态位适宜性评价相关模型, 探讨了生态位适宜性单一指数和综合指数的计算方法; 结合土壤利用改良分区、土壤利用功能分区、富硒农业生产分区等, 分析了区域富硒土壤资源开发利用适宜性分区问题。研究可为富硒土壤资源开发利用适宜性评价提供科学可行的思路与方法, 对于促进区域富硒土壤资源科学合理利用、实现富硒农业产业科学发展具有重要的指导意义和现实意义。

关键词: 富硒土壤; 富硒农业产业; 生态位理论; 适宜性评价

Suitability evaluation and zoning method research on development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory

CAI Haisheng^{1,2}, CHEN Yi¹, ZHANG Xueling^{1,*}

1 Key Laboratory of Po-yang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province/Development Research Center of Selenium-rich Agricultural Industry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Jiangxi Tourism and Commerce Vocational College, Nanchang 330100, China

Abstract: To implement the strategy of rural revitalization, industry prosperity is the key. An effective way to revitalize the rural industry is to develop a characteristic economy of selenium-rich agriculture based on the advantage of regional selenium-rich soil resource endowment. Using multidimensional hyper-volume niche theory as the guide, with regional selenium-rich soil resources endowment and selenium-rich agricultural development as the foundation, from three aspects of soil conditions, land use and ecological protection, to clear about the selenium-rich soil resources development and utilization of the dominant factor, geographical factors, limiting factors, discussed to build the selenium-rich soil resources development and utilization of ecological suitability evaluation index system. The method of calculating the comprehensive index of niche suitability for the exploitation and utilization of selenium-rich soil resources was discussed using the relevant model of niche suitability evaluation. Based on the improved zoning of soil utilization, the functional zoning of soil utilization, and the zoning of selenium-rich agricultural production, the suitability zoning of regional selenium-rich soil

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660140, 31560150); 江西省高校人文社科重点研究基地项目(2018-32); 江西省土地开发整理中心项目(2019-026)

收稿日期: 2020-02-11 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ok_zhangxl@126.com

resources was analyzed. This research can provide scientific and feasible ideas and methods for evaluating the suitability of exploitation and utilization of selenium-rich soil resources. It also produced important guidance with practical significance, which will promote scientific and rational utilization of selenium-rich soil resources in the region and realization of the scientific development of a selenium-rich agricultural industry.

Key Words: selenium-rich soil; selenium-rich agriculture industry; niche theory; suitability evaluation

随着社会的不断进步和经济的飞速发展,人们对健康问题越来越重视。硒是人体不可或缺的微量元素,是世界卫生组织确定为继碘、锌之后的第三大营养保健微量元素,具有抗氧化、提高人体免疫力、维持甲状腺发挥正常作用、预防心血管疾病等诸多功能,缺硒会导致人体内硒蛋白含量下降引发多种病症^[1-5]。人体无法自主合成硒,食物中的硒是主要来源,而食物中的硒是由土壤中的硒元素迁移而来^[6]。据统计,世界上有40多个国家和地区土壤缺硒。我国约72%的国土为国际公认的缺硒地区(土壤硒含量 ≤ 0.1 mg/kg),其中约30%为严重缺硒(土壤硒含量 ≤ 0.02 mg/kg),涉及22个省(市、区),覆盖约7亿人口。2019年7月,国务院出台《健康中国行动(2019—2030年)》等相关文件,提出了健康知识普及、合理膳食、发展健康产业等15个重大专项行动,将全民健康提到了前所未有的高度。这些举措对进一步加快转变农业发展方式、推动功能农业发展具有重要的指导意义。当前,各地都非常看好富硒产业的发展潜力,重视和支持富硒产业发展,积极开展富硒土壤资源调查和利用规划,出台相关政策扶持富硒产业发展。实施乡村振兴战略,产业兴旺是关键,开发富硒土壤、发展富硒农业、生产富硒产品,彰显了区域农业产业特色,顺应了健康中国的需求,具有非常广阔的发展空间和市场前景。

如何科学高效绿色的对富硒土壤资源进行开发利用,是富硒农业产业发展的关键前提。目前,土壤硒资源的相关研究主要包括硒的理化性质^[7-8]、硒在农作物中的迁移转运机制^[9, 10]、硒资源的分布特征及影响因素^[11-14]、硒资源的调查与评价^[15-19]等方面,对于土壤硒资源的综合评价及开发利用的研究,相关学者运用层次分析法对土壤硒资源、富硒区耕地质量、富硒茶园、富硒康养旅游的开发潜力进行适宜性评价^[20-24]。由此可见,目前学者多把关注点置于研究土壤硒资源的内部特性及其与作物之间的内在转化,而对土壤硒资源定量评价的研究相对较少,研究方法略显局限,土壤硒资源评价与富硒产业的联动性尚未得到足够的重视,且缺乏相关综合评价方法。针对现有研究的不足,本研究立足富硒农业生产的主导因素和限制因素的基础上,引入多维超体积生态位理论构建富硒土壤资源开发利用适宜性评价体系,为富硒土壤资源有效利用和富硒农业产业健康发展提供有效的决策支撑。

生态位是生态系统中每种生物生存所必需的生境最小阈值,生态位理论包括生态位宽度、生态位重叠、生态位分离、生态位扩充与压缩等基本内容,是生态学中的重要理论之一。随着该理论的深入研究,除了应用于生态领域,在土地整治、建设用地适宜性评价、高标准农田建设适宜性评价、农村居民点适宜度评价、国土空间综合功能分区、土地开发适宜性评价等与土地资源相关的领域,亦有广泛的应用^[25-33]。本文主要讨论将生态位理论引入富硒土壤资源开发利用适宜性评价研究,拟通过最适生态位解释富硒土壤资源开发利用的适宜性,利用区域富硒土壤的现实生态位和最适生态位的差异程度,划分开发利用的适宜性等级,确定富硒土壤资源开发利用的区域定位和重点方向,以期解决富硒土壤资源无序、盲目、粗放开发利用问题,为定量分析富硒土壤资源开发利用的适宜性评价探索一条新路子,促进富硒土壤资源科学合理的开发利用,为乡村产业振兴提供一条有效的途径。

1 富硒土壤生态位理论解释及其开发利用评价概述

1.1 生态位视角下富硒土壤资源开发利用的内涵

生态位概念最早是由格林内尔(Grinnell)在1917年提出,其意义为一个物种能够生存和繁衍后代的所有

条件的总和,后来相关学者对生态位内涵进行了补充与拓展,细分出空间生态位、功能生态位、多维超体积生态位、基础生态位、现实生态位等,并提出生态位适宜度概念,用来表述生物对其生境条件的适宜性程度^[25,31]。生态位理论不仅在动物生态学中得到应用,在资源评价、农业生产、城市规划等领域也得到了越来越广泛的应用。国内许多学者也开展了相关研究,进一步把生态位理论应用拓展到“自然-经济-社会”复合生态系统中,将能够在这个复合生态系统中进行物质转化、能量转换、信息处理等生态学过程的生物功能单元和其它功能单元称作生态元,并把能够被生态元利用和适应的生态因子称为生态位^[34]。类似多维超体积生态位理论,区域发展依赖于由“自然-经济-社会”等多维现实资源构成的支撑空间,这种多维空间即区域发展资源支撑最适生态位,与现实资源条件提供的现实生态位的耦合分析,即可衡量资源条件对区域发展的适宜性程度^[34-35]。

富硒土壤生态系统作为土地生态系统的一部分,时刻都在发生着物质循环、能量交换与信息传递,是一种动态开放的“自然-经济-社会”复合生态系统。可见,富硒土壤生态系统也是一种生态元,富硒土壤资源利用同样具有其最适生态位。土地资源开发利用作为一种系统性的综合工程,其开发利用效果与多维空间上的资源条件有着密切的联系。若将富硒土壤资源开发利用比作一种生物行为,则富硒土壤资源开发利用适宜性评价分区的关键就是找到与利用行为相适宜的空间位置。因此,富硒土壤利用生态位的概念可表述为:在土壤硒资源丰富的区域范围内,综合考虑富硒土壤资源开发利用受到土壤资源禀赋、土地利用条件、土壤环境质量、人为外在干扰等多个维度要素制约的基础上,该区域富硒土壤资源生态元在开发利用过程中所占有的地位、作用以及与其它土地利用类型生态元的关联程度,即富硒土壤利用资源生态位。用函数表示:

$$F = f(x_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, F 表示研究区富硒土壤利用生态位; x_i 表示影响富硒土壤资源利用生态位大小的各维度因素,即生态位因子; i 表示生态位因子的总个数。

因此,从生态位视野考虑,富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区的关键,是要充分考虑富硒土壤资源禀赋以及土地利用条件、土壤环境质量、人为外在干扰等多维因素的作用与地位,对富硒土壤资源利用中相关农业生产主导因素和限制因素的平衡协调,通过确定各维因素对于富硒土壤资源开发利用的最适阈值,进而得出不同适宜程度的生态位空间,为富硒农业生产提供基础支撑。

1.2 富硒土壤资源的开发利用适宜性评价概述

土壤资源是指具有农、林、牧业生产力的各种土壤类型的总称,是人类赖以生存的最基本、最广泛、最重要的生产资料和自然资源。土壤资源评价是指对土壤资源的质量、适宜性和限制性作出评定,是一个多目标的评价系统,包括土壤自然适宜性评价、土壤生产潜力评价、土壤经济评价等层面^[36]。针对土壤资源适宜性评价研究,早在二十世纪初期美国就制定关于土壤潜力分级评价标准,随后土地合理利用开始引起全球重视,德国、日本、英国、苏联等国的专家学者相继针对本国土地调查、土壤潜力等方面出台相关标准。二十世纪七八十年代,随着多学科的交叉渗透和计算机技术的发展,土地开发利用适宜性评价方法日趋多层次、多领域、定量化和可视化。在此时期,影响最大、使用最广泛的是联合国粮农组织在1976年颁布的《土地评价纲要》,明确将土地利用评价分为纲、类、亚类、单元四个适宜性评价等级。二十世纪五十年代,我国开启的大范围荒地调查,开创了土地适宜性研究的先河,随后国内专家学者陆续开展了不同范围、不同领域的土壤与土地适宜性评价研究,借助于地理信息技术和遥感技术的兴起,评价方法的综合性、系统性和精确性得到提高^[36-37]。特别是近年来,土地利用规划、国土主体功能区划、国土空间规划等都将土壤与土地利用适应性评价作为一项基础工作。

针对土壤适宜性评价,通常采用多层次多目标的评价方法。其特点是:地域范围从大到小;评价效应从宏观到微观;指标选择从单一到综合。一般采用三级评价系统^[37-38]:第一层次,主要依据地理分布构成的水热条件,及生物气候条件或农业耕作制度上的差异进行划分;第二层次,主要按土壤对农、林、牧的适宜性进行划分;第三层次,主要以土壤对某种具体用途的适宜性程度、限制因素的作用大小等为依据来划分。土壤适宜性

分区方面,主要依据地貌、气候、土壤、植被等自然条件,其次是土壤利用的现状及其特点,再次是土壤利用的经济社会条件状况,进行综合分析。评价的重点是与土壤资源有效利用结合起来,分析土壤资源的构成要素及其组合属性、土壤利用的状况和特点、土壤利用方向的远景规划等方面的区域间显著差异性和区域内的相对一致性。

显然,富硒土壤资源开发利用的适宜性评价是针对富硒土壤对富硒农业具体用途而进行的适宜性评价,重点在探究富硒土壤资源禀赋与利用方向的适配性,探究富硒土壤资源现实条件(生态位)与富硒农业生产资源理想需求(生态位)的适配性,需要综合考虑自然、经济、社会等多种因素,融合生态学、地理学、农学、经济学及相关学科的方法技术,核心是寻找土壤用途与土壤质量的最佳匹配,是寻求土地利用最优结构及模式的先决条件,也是土地资源可持续利用和管理的前提与基础。近年来,富硒土壤资源利用适宜性评价理论和方法得到不断的发展和完善,特别是围绕土壤适宜性评价的针对性、比较性、区域性、综合性、系统性、主导性、生产性等方面,开展了大量的研究。因为对富硒土壤适宜性评价测度分析的角度和因素选取各有侧重,选取的测度方法和评价指标各有不同^[21-24,39-40]。表1中列举出部分学者研究所用的测度方法及评价指标。

表1 富硒土壤资源开发利用适宜性评价测度方法及指标选取比较分析

Table 1 Comparative analysis on the evaluation method and index selection of suitability for exploitation and utilization of selenium-rich soil resources

评价内容 Evaluation content	测度方法 Measure method	一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators
富硒康养旅游开发潜力评价 Tourism development potential evaluation	德尔菲法、层次分析法	自然康养资源、人文康养资源、康养生态环境、康养人文环境、康养市场需求、康养市场供给、区位条件、旅游业基础、社会保障、技术支持	山地景观、水域风光、气候舒适度、康养建筑与设施、富硒产品多样性、空气洁净度、地表水质量、植被覆盖率、土壤环境质量、康养文化氛围、社交环境质量、区域老龄人口数量、空间地理位置、外部交通条件、发展人才保障、智慧旅游技术等
富硒土壤资源评价 Evaluation of selenium-rich soil resources	统计分析法、变异系数法、相关性分析、GIS空间分析	土壤硒含量、土壤环境健康元素、土壤养分	土壤硒含量、铬含量、镁含量、氮含量、铅含量、锌含量、汞含量、磷含量、钾含量、钴含量、钼含量等
富硒茶园适宜性评价 Evaluation on the suitability of selenium-rich tea garden	德尔菲法、层次分析法、GIS空间分析	地形要素、土壤要素、交通水城要素	坡度坡向、海拔高度、剖面曲率、交通距离、水源距离、土壤富硒值、pH值
土壤硒资源评价 Evaluation of soil selenium resources	层次分析法、GIS空间分析法	土壤含硒情况、土壤养分、土壤环境质量	土壤硒含量、有机碳总量、氮总量、农药含量、DDT含量、六氯环己烷含量、多环芳烃
富硒区耕地质量评价及利用分区 Evaluation of cultivated land quality and land-use zoning in selenium-rich areas	层次分析法、多因素综合评判法	耕地土壤肥力、耕地利用条件、土壤硒元素含量	pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、海拔、坡度、坡向、灌溉保证率、道路通达度、硒含量
富硒土壤重金属安全性评价、多目标地球化学调查评价 Safety evaluation of heavy metals in selenium-rich soil	多因子综合分析法	土壤、植物	土壤重金属含量、稻米
富硒土壤调查与评价 Investigation and evaluation of selenium-rich soil	因素评价法	土壤硒含量	极高硒土壤、高硒土壤、中硒土壤、低硒土壤、极低硒土壤

综上所述,针对富硒土壤资源开发利用适宜性评价的目标导向多种多样,包括耕地质量、农业生产、康养旅游等方面,评价区域分布较广,评价范围大小不一。测度方法方面从早期的定性研究转向选取指标定量评价,再由定量指标评价发展为指标评价与计算机技术和数学模型相结合,评价结果的科学性和精确性逐步提高;测度指标的选取依据评价目的,考虑到土壤自身条件、地形地貌、交通区位、人文条件等自然、经济、社会方

面的因素,能够较为客观、合理、科学地评价富硒土壤资源特征及其利用潜力。但仍有以下不足之处:

(1) 研究内容方面:现有研究多关注于富硒土壤的理化性质、资源调查、分布特征及影响因素、富硒农业生产、开发利用可行性分析等方面,针对富硒土壤开发利用深入研究的并不多,对于土壤硒资源的综合开发利用适宜性评价和利用分区研究相对比较薄弱,特别是研究过程中定性定量相结合的研究比较少。

(2) 测度方法方面:现有关于富硒土壤适宜性评价的研究方法,多采用德尔菲法和层次分析法与 GIS 技术相结合的测度方法,理论方法的创新性和客观性稍有欠缺,适宜性评价的综合性不足,应进一步考虑与产业布局规划相关的生态保护、土地利用条件等相关因素,以便提高评价成果的有效性和实用性。

(3) 指标选取方面:现有评价指标体系构建,主要涉及到区位条件、地形要素、土壤含硒情况、土壤养分、环境质量等方面,强调富硒土壤分布特征和理化性状的比较多,结合富硒土壤资源开发利用的农业生产主导因素和限制因素讨论的比较少,指标选取存在一定的局限性,难以科学、全面地评价开发利用的适宜性。

2 富硒土壤利用生态位适宜性评价研究思路与技术框架

2.1 基本思路

实施乡村振兴战略,产业兴旺是重点。立足区域富硒土壤的资源禀赋优势,把富硒资源优势转化为资本优势和产业优势,大力发展富硒农业产业,打造现代农业产业新特色、新优势、新名片,是实施乡村振兴战略和健康中国战略、全面建成小康社会的新要求、新任务、新机遇。开展富硒土壤资源开发利用适宜性评价与分区研究,实现富硒土壤资源绿色高效生态利用,是发展富硒特色农业产业的基础支撑和重要保障。以生态位理论为基础,将富硒土壤开发利用看作自然环境中的一种生物行为,讨论富硒土壤开发利用的需求生态位与现实生态位的匹配问题,结合富硒农业生产的主要区位因素、主导因素和限制性因素,寻找到发展富硒农业所需要的空间位置,并根据适宜程度进行分级分区,是富硒农业产业发展的一项基础性研究工作。

为此,可依托多维超体积生态位理论,综合考虑富硒土壤利用的主要区位因素、主导因素和限制因素,将满足富硒农业发展的富硒土壤开发利用对资源需求所构成的空间谓之需求生态位,将该区域富硒土壤开发利用的现实资源水平谓之现实生态位,分析富硒土壤资源现实条件对富硒农业生产利用方式的适宜性程度。在“自然-经济-社会”复合生态系统中,富硒土壤开发利用受到主要区位因子、农业主导因子、农业限制因子等生态元的影响,每个因子对富硒土壤利用和富硒农业生产都有一定的适合度阈值,只有在这些阈值所限定的区域内,富硒土壤开发利用才能科学合理适宜、富硒农业发展才能绿色生态高效。一般情况下,富硒土壤开发利用的生态元类型及相关生态因子如表 2:

表 2 富硒土壤资源利用适宜性评价相关生态元及生态因子

Table 2 Ecological element and ecological factor of evaluation on the suitability of selenium-rich soil resources utilization

目标层 Target layer	准则层(生态元维度) Criterion layer	指标层(生态因子) Index Layer	说明 Explain
富硒土壤开发利用生态位适宜性 Niche suitability of exploitation and utilization of selenium-rich soil	富硒农业生产区位因素	地形、地貌、水文、气候、土壤、地质等自然条件,以及区位定位、经济特色、产业基础、扶持政策、科学技术、劳动力、市场建设、农业基础设施建设等社会经济条件。	指区域富硒农业发展需要的主要自然、经济和社会因素条件,是富硒土壤开发利用的基础支撑。
	富硒农业生产主导因素	富硒土壤资源	指区域富硒农业发展中最重要的因素条件,没有这种因素或条件就不可能讨论开发利用、发展富硒农业。
	富硒农业生产限制因素	光热条件、灌溉条件、土地利用类型、土壤肥力、环境质量、生态建设等自然和人为因素。	指区域富硒农业生产需要满足的主要条件或关键指标,否则就不可能实现科学合理适宜的开发利用。

因为区域不同,富硒土壤开发利用的条件不同,所以考虑的生态维度、指标因子会有所差异

以多维超体积生态位理论为指导,实施富硒土壤开发利用适宜性评价与分区研究,基本步骤如下:①明确评价目的,确定评价区域;②确定区域富硒土壤开发利用相关生态元维度和生态因子,构建适应性评价指标体系;③明确评价单元,收集评价相关指标数据并处理分析;④单因子评价:确定各评价指标因子等级或权重,形成单因子评价图层;⑤综合评价:选择多维度生态位适应性评价模型,计算各评价单元生态位适宜性综合指数;⑥评价结果分析:运用 GIS 空间分析技术,根据自然断点法将评价结果划分成四个等级:高适宜、中适宜、低适宜和不适宜,形成适宜性评价结果空间分布图;⑦利用功能分区:采用聚类分析法进行富硒土壤利用功能适应性分区,根据“宜林则林、宜农则农”等原则确定主体功能区,明确富硒水稻、富硒蔬菜、富硒中药材、富硒林果等生产功能区,分析主导障碍因素,确定富硒农业空间发展布局,并生成适宜性评价分区图。最终研究结果,将为研究区富硒土壤资源开发利用和富硒农业产业发展布局提供可行性建议和科学决策依据。

2.2 技术框架

基于多维超体积生态位理论,运用 GIS 相关技术,进行富硒土壤资源开发利用适宜性评价与分区研究技术路线图如图 1,实施步骤如下:①资料收集分析:收集富硒农业生产区位因素、主导因素、限制因素等生态位评价因子相关资料和数据;②数据库构建:包括地貌类型、数字高程、土壤类型、水文气候、土地利用类型、土壤环境质量等空间数据和属性数据,形成各生态位适宜性评价指标因子图层;③数据处理分析:根据适宜性评价因子生态位适宜性测算模型,进行单因子评价;通过空间叠加分析以及生态位适宜性综合指数模型,进行生态位适宜性综合评价;④评价结果应用:基于 GIS 空间叠加分析,根据自然断点法划分四个适宜性等级,并绘制生态位适宜性评价结果图;分析各区主导障碍因素,结合评价结果以及产业发展现状,确定研究区富硒土壤资源开发利用功能分区。

3 富硒土壤利用生态位适宜性评价及分区方法

3.1 生态位适宜性评价模型构建

富硒土壤资源开发利用受到资源禀赋、生态保护、环境质量等多维生态因子的综合制约,当评价单元内土壤资源现实条件与富硒土壤资源开发利用需求达到高度匹配时,设定该评价单元的生态位适宜度为 1;当评价单元内土壤资源现实条件完全不满足富硒土壤资源开发利用需求时,设定该评价单元的生态位适宜度为 0。从富硒土壤开发利用生态位角度考虑,主要有主导因素、区位因素、限制因素三种生态元,利用 GIS 技术,以最小图斑或划定网格确定最小单元,通过对评价因子的理想生态位和现实生态位比较分析,可以计算单因子生态位适宜性指数、生态位适宜性综合指数,指数为区间值 $[0, 1]$,来定量分析富硒土壤资源的开发利用适宜性^[32-33, 41]。

3.1.1 单因子生态位适宜性分析

主要结合富硒土壤资源开发利用的主导因素、区位因素、限制因素 3 种类型的评价因子进行,包含正向因子和负向因子。通过比较分析每个因子的理想生态位和现实生态位,以确定该评价因子的生态位适宜性。

(1) 主导因子:也是关键因子、决定因素,必须满足其最低要求,而且越丰富越有利于富硒土壤资源开发利用,属于正向因子。针对富硒土壤资源开发利用,主导因子就是土壤中的硒含量,这是发展富硒农业的根本前提。一般情况,含量越高,越有利于富硒土壤资源开发利用,发展天然富硒农业。评价单元的生态位适宜性可以用公式表示如下:

$$N_i = \begin{cases} 0 & X_i < D_{i\min} \\ \frac{X_i}{D_{i\text{opt}}} & D_{i\min} \leq X_i < D_{i\text{opt}} \\ 1 & X_i \geq D_{i\text{opt}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_i 为评价因子 i 的生态位适宜度($i \in [1, n]$), X_i 为评价因子 i 的现实生态位, $D_{i\text{opt}}$ 为富硒土壤资源评价因子 i 的最适生态位, $D_{i\min}$ 为评价因子 i 的生态位的最小值。考虑到土壤含硒情况一般分为:高富硒土壤

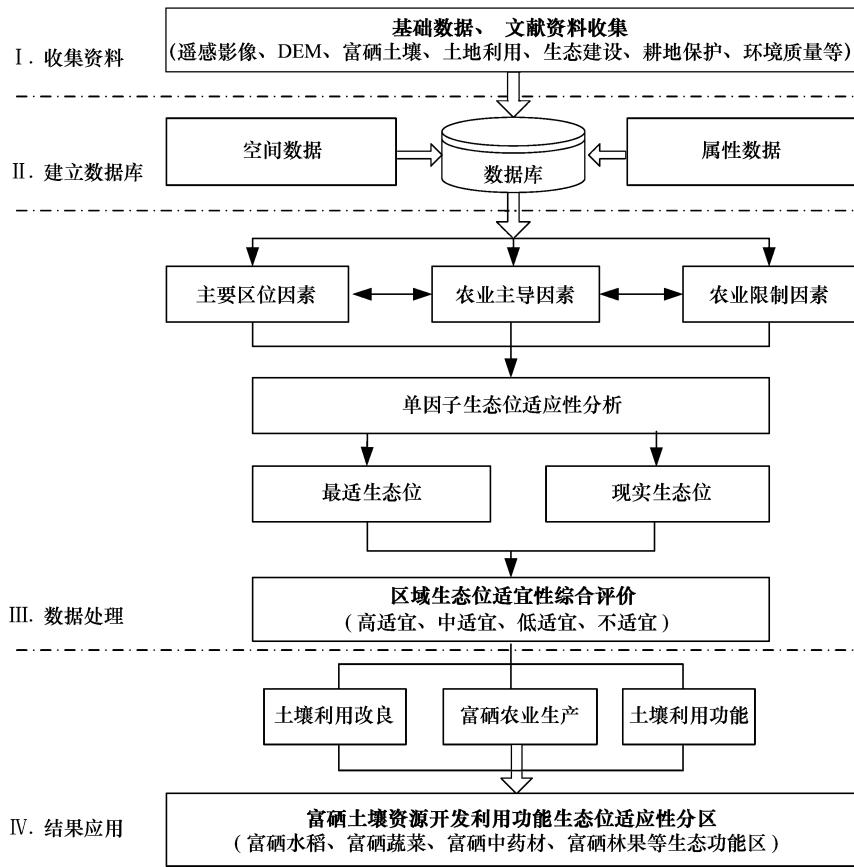


图 1 基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价技术路线图

Fig.1 Technology roadmap for the development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory

($Se \geq 3.0 \text{ mg/kg}$)、富硒土壤($Se \geq 0.4 \text{ mg/kg}$)、潜在富硒土壤($0.4 \text{ mg/kg} > Se \geq 0.3 \text{ mg/kg}$)、足硒土壤($0.3 \text{ mg/kg} > Se \geq 0.175 \text{ mg/kg}$)、潜在硒不足土壤($0.175 \text{ mg/kg} > Se \geq 0.125 \text{ mg/kg}$)、缺硒土壤($Se < 0.125 \text{ mg/kg}$)。可以考虑确定, D_{imin} 为土壤含硒 0.125 mg/kg , D_{iopt} 为土壤含硒 0.4 mg/kg 。

(2) 区位因子: 主要指区域富硒农业发展涉及到的自然、经济和社会因素条件, 是富硒土壤开发利用的基础支撑。这些支撑条件可以是一个适宜的区间, 支撑条件过高或过低都不利于富硒土壤资源开发利用。如: 区域降水条件、地形坡度、地表高程、土壤肥力、人口密度、科技水平等, 可以选择区域最典型区位因子评价。评价单元的生态位适宜性可以用公式表示如下:

$$N_i = \begin{cases} 0 & X_i \leq D_{imin} \text{ or } X_i \geq D_{imax} \\ (X_i - D_{imin}) / (D_{iopt} - D_{imin}) & D_{imin} < X_i < D_{iopt} \\ (X_{imax} - X_i) / (D_{imax} - D_{iopt}) & D_{iopt} \leq X_i < D_{imax} \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_i 为评价因子 i 的生态位适宜度 ($i \in [1, n]$), X_i 为评价因子 i 的现实生态位, D_{iopt} 为富硒土壤资源评价因子 i 的最适生态位, D_{imin} 为评价因子 i 的生态位的最小值, D_{imax} 为评价因子 i 的生态位的最大值。

(3) 限制因子: 指区域富硒农业生产需要满足的主要条件或关键指标, 包括自然限制因子和人为限制因子, 否则就不可能实现科学合理适宜地开发利用富硒土壤。限制因子为负向因子, 其现实生态位值越小越有利于富硒土壤资源开发利用。如: 环境污染状况、灾害发生频率、人为干扰活动等, 可以选择区域主导限制因子评价。评价单元的生态位适宜性可以用公式表示如下:

$$N_i = \begin{cases} 1 & X_i \leq D_{i\min} \\ 1 - \frac{X_i - D_{i\min}}{D_{i\max} - D_{i\min}} & D_{i\min} < X_i < D_{i\max} \\ 0 & X_i \geq D_{i\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, N_i 为评价因子 i 的生态位适宜度 ($i \in [1, n]$), X_i 为评价因子 i 的现实生态位, $D_{i\text{opt}}$ 为富硒土壤资源评价因子 i 的最适生态位, $D_{i\min}$ 为评价因子 i 的生态位的最小值, $D_{i\max}$ 为评价因子 i 的生态位的最大值。

通过确定主导因素、区位因素、限制因素 3 种类型的评价因子各自的理想生态位和最适生态位区间, 结合以上公式, 与各评价单元现实生态位进行比较分析, 进行适宜性等级划分(高适宜、中适宜、低适宜、不适宜), 在 GIS 支持下最终确定各评价因子生态位适宜性空间分布特性。

3.1.2 生态位适宜性综合分析

富硒土壤开发利用生态位是自然因素和人为因素确定的多维超体积生态位空间, 评价单元的适宜度是主导因素、区位因素、限制因素等 3 个维度生态位适宜性综合作用的结果。根据评价单元划分的不同、评价目标需求的不同, 以及评价因子生态位适宜性对评价单元整体生态位适宜性的影响程度, 可通过 Shefold 限制性定律、因子生态位适宜性加权求和综合分析法相结合, 计算分析评价区域各单元生态位适宜性综合指数, 在 GIS 支持下最终确定评价区域生态位综合适宜性空间分布特性。

(1) 基于 Shefold 限制性定律综合指数分析: Shefold 限制性定律规定任何一个生态因子在数量上或质量上的不足, 就会导致该生物的衰退或不能生存^[41]。因此, 富硒土壤资源开发利用生态位适宜性是多维多元因素共同作用的结果, 多维或多元因子生态位适宜性综合指数模型为:

$$N = \left[\prod_{i=1}^n N_i \right]^{1/n} \quad (5)$$

式中, N 为富硒土壤资源开发利用多维或多元因子生态位适宜性综合指数, N_i 为评价维度 i 或评价因子 i 的生态位适宜度 ($i \in [1, n]$), n 为富硒土壤资源利用所考虑的生态位维数或评价因子个数。

(2) 生态位适宜性加权求和综合分析法: 基于富硒土壤资源开发利用受到多种因素影响, 其生态位适宜性是多维或多元因子共同作用的结果, 则不同生态维度、不同生态因子对生态位适宜性的作用各有不同, 通过确定不同维度的生态位适宜性及其对整个评价单元的生态位适宜性的影响程度, 进行生态位适宜度加权求和便可计算出评价单元的生态位适宜性综合指数, 进一步确定评价单元的生态位适宜性等级, 及其评价区域生态位适宜性等级分布状况。计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n (N_i \times W_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中, S 为评价单元生态位适宜性加权求和综合指数, N_i 为第 i 个维度的生态位适宜性综合指数, W_i 为第 i 个维度的生态位适宜性对整个单元生态位适宜性的影响权重, n 为富硒土壤资源利用所考虑的生态位维数。根据前文分析, 此处 n 为 3, 即包含主导因素、区位因素、限制因素 3 个生态维度。

通过以上综合分析, 可以确定评价单元生态位适宜性综合等级(高适宜、中适宜、低适宜、不适宜), 在 GIS 支持下, 根据自然断点法、聚类分析法进一步将适宜性评价结果分为四个等级: 高适宜区、中适宜区、低适宜区和不适宜区。

3.2 生态位适宜性评价指标体系构建

一般情况下, 适宜性评价指标选取遵循科学性、主导性、差异性、综合性、可操作性和数据可获取性等原则^[26], 根据不同的评价目标与不同的空间尺度, 评价指标的选取和评价指标体系的构建的侧重有所不同。要避免评价指标选取越多越好、评价指标体系越复杂越好的误区, 应该以选用最少的评价因子, 科学客观区分出评价区域内各评价单元生态适宜性等级为上。针对富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价, 关键就是为富硒农业发展提供基础条件支撑, 相关因子的选取及其因子最适生态位的确定, 皆以能够满足富硒农业生产要

求为根本前提。

3.2.1 评价指标选取与体系构建

从富硒土壤资源开发利用以发展富硒农业生产角度来看,最关键的是明确土壤利用和农业生产的主导因素、区位因素、限制因素,以及相关因子生态位适宜度。简单讲:主导因素就是有没有富硒土壤,其资源禀赋情况如何;区位因素就是针对富硒土壤开发利用有什么样的自然与人文支撑条件,能否满足富硒农业的发展需求;限制因素就是针对富硒土壤开发利用有什么制约因素,制约程度、刚性如何。基于以上分析,根据多维超体积生态理论,富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价可从主导因素、区位因素、限制因素 3 个维度考虑评价因子的选择:

(1)主导因子:土壤硒含量。可结合富硒、潜在富硒、足硒、潜在硒不足、缺硒等 5 个等级,分析富硒土壤资源利用的基础条件,比较分析土壤资源的现实生态位和最适生态位。

(2)区位因子:包括自然、经济、社会等条件因素。从农业生产角度考虑,最关键的是光热条件、土壤肥力、灌溉条件、地形坡度、人均耕地等。由于研究区域空间尺度的不同,选取的因子可以进一步聚焦,突出关键区位因素。从大尺度讲,光照条件、水文条件、人均耕地等是关键因子;从小尺度讲,土壤肥力、灌溉条件、地形坡度等是关键因子。

(3)限制因子:包括自然和人为干扰因子,对富硒土壤资源利用形成约束效应。从农业生产角度考虑,土地利用类型、农业环境质量、生态保护建设、农业灾害隐患等,都对富硒土壤资源利用形成制约。土地利用类型首先要保证是农业用地,最好是耕地,其它类型的土地难以开发利用;农业环境质量考虑的是土壤利用不能受到有机污染或无机污染,特别是重金属、农药、污水等有害有毒物质污染;生态保护建设主要考虑土壤资源开发利用不要破坏生态保护地,特别是不能破坏生态红线;农业灾害隐患包括旱涝灾害、农业病虫害,及土地流失、土壤退化等生态灾害等,直接影响到土壤利用效率。限制因子选择同样受到研究尺度的影响,要充分考虑选取因子与研究尺度的匹配性。

综上所述,考虑到富硒土壤资源开发利用和富硒农业发展主要在县域以内的中小尺度上进行,从富硒土壤开发利用的自身条件、土地利用和生态保护 3 方面综合考虑,结合主导因素、区位因素、限制因素可以选择土壤硒含量、土壤肥力、地形坡度、土地利用类型(基本农田保护)、农业环境质量、生态保护建设(生态红线)等 6 个关键因子,构建富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价指标体系。

3.2.2 评价因子最适生态位确定与适宜性等级划分

根据前文分析,富硒土壤资源开发利用生态位综合适宜性取决于每个评价因子的现实生态位。每个评价因子都有最适生态位值,设定生态位适宜性指数是 $[0, 1]$ 之间。当评价因子为正向因子时,其指标值越大则生态位值越大,相对而言富硒土壤资源开发利用适宜性越强;当评价因子为负向因子时,其指标值越小则生态位值越大,相对而言富硒土壤资源开发利用适宜性越强。一般情况下,针对中小尺度的研究区域,参考前文构建的指标体系,可选择土壤硒含量、土壤有机质含量、地形坡度、土地利用类型、土地综合污染指数、生态保护建设等 6 个关键因子,各因子生态位最适生态位与现实生态位适宜性等级划分见表 3。

3.3 生态位适宜性利用分区

富硒土壤资源利用分区以地域分异规律为理论基础,以利用功能适宜性为根本要求,以坚持土壤利用改良措施相对一致性、利用方向和途径相对一致性、社会经济条件相对一致性为基本原则,以实现土地利用安全、生态适宜、产出高效为目标,是调整土地利用结构、优化农业产业布局、促进区域协调发展的关键手段。结合生态位适应性评价结果,可以从“土壤利用改良”“土地利用功能”“富硒农业生产”讨论富硒土壤资源开发利用分区问题。

3.3.1 土壤利用改良分区

开展富硒土壤资源开发利用适宜性评价,目的是能够实现富硒土壤的科学合理适宜高效的开发利用。明确各单元评价因子现实生态位和最适生态位的差异,特别是针对其中关键性障碍因素提出改良对策,是提高

生态位适宜性评价现实意义,促进富硒土壤资源合理高效利用的关键举措。可以通过引入障碍度诊断模型,来识别并定量分析区域富硒土壤资源的主导障碍因子^[29,42-43],为土壤利用改良明确方向和目标。诊断模型为:

$$C = \min\{N_1, N_2, \dots, N_6\} \quad (7)$$

式中, C 为评价单元的障碍因子,为第 i 个评价因子的生态位适宜性指数值, N_i 最小的作为该评价单元的障碍因子。

表3 富硒土壤资源开发利用适宜性评价指标体系及最适生态位值

Table 3 Appropriateness evaluation index system and optimal niche value of selenium-enriched soil resources development and utilization

评价因子 Evaluation factor	单位	评价因子现实生态位等级 Evaluation index suitability score				最适值 Most suitable value	指标类型 Indicat or type	分级依据 Gradation basis
		I级 (高适宜)	II级 (中适宜)	III级 (低适宜)	IV级 (不适宜)			
土壤硒含量 Soil selenium content	mg/kg	富硒 ($Se \geq 0.4$)	潜在富硒 ($0.4 > Se \geq 0.3$)	足硒 ($0.3 > Se \geq 0.175$)	缺硒 ($Se < 0.175$)	$Se \geq 0.4$	正向	土壤富硒标准
土壤有机质含量 Soil organic matter content	%	$>3\%$	$2\% - 3\%$	$1\% - 2\%$	$<1\%$	$>2\%$	正向	全国第二次土壤普查标准
土地利用类型 Land use type	无量纲	耕地	园地	林地、草地等 它农用地	其建设用地、水域、 其他土地、农用地		正向	土地利用分类
地形坡度 Terrain slope	°	$<6^\circ$	$6^\circ - 15^\circ$	$15^\circ - 25^\circ$	$>25^\circ$	$>2^\circ$	负向	耕地等级标准
土壤综合污染指数 Comprehensive pollution index of soil	无量纲	清洁 ($P_{综} \geq 1.0$)	轻度污染 ($1.0 > P_{综} \geq 2.0$)	中度污染 ($2.0 > P_{综} \geq 3.0$)	重度污染 ($P_{综} > 3.0$)	$P_{综} \geq 2.0$	负向	内梅罗指数法
生态保护建设 Ecological conservation construction	无量纲	生态红线与 生态保护地外	其它生态 保护地	生态红线 范围内	保护地外	负向	生态保护	

通过结合土地利用功能分区、富硒农业产业分区或研究区域下辖乡镇村界线,对以上相关区域内各评价单元的障碍因子进行排序,取最小的3个作为该分区的主导障碍因子,得出影响该分区富硒土壤资源开发利用的主要障碍因素。在制定相关富硒土壤利用方案时,注意采取措施减轻或消除这些障碍因素,提高富硒土壤利用的安全性和有效性。

3.3.2 土壤利用功能分区

土地利用分区以地域分异规律理论为指导,根据土地利用条件、利用方式、利用方向、开发潜力和管理措施的相似性和差异性,将研究区内土地划分为不同的利用区域,为优化利用结构、集约高效利用、实现有效管控、促进区域协调等提供科学依据。富硒土壤资源开发利用要服从土地利用规划、土地用途管理和土地利用功能分区,同时,土地利用功能分区要立足于土地利用现状、土壤资源禀赋,实现土壤资源的科学合理、适宜高效的开发利用。

区域尺度土壤利用功能分区,就是在GIS支持下,结合区域富硒土壤资源开发利用适宜性评价结果、不同区位富硒土壤资源利用生态位特征,以及区域内富硒农业产业发展布局,明确不同区位的利用现状、功能定位、发展方位、发展潜力等,坚持“宜农则农”“宜林则林”“宜牧则牧”的原则,将富硒土壤区划分为若干个功能区,如:城镇建设区、农业主产区、林业主产区、牧业主产区、生态屏障区等,以便有针对性地制定利用与管理对策,实行差别化、适应性管理,提高富硒土壤的现实使用价值。

3.3.3 富硒农业产业分区

实施乡村振兴战略,实现产业兴旺,关键是找准和培养自身产业发展特色和优势,才能走上一条兴农富民的发展道路。在“健康中国”背景下,普及健康生活、建设健康环境、发展健康产业,加快转变农业发展方式,拓展农业多种功能,实施食品安全战略,具有广阔的发展空间。目前,湖北恩施、江西丰城、陕西安康、青海平

安等地已经走在了富硒土壤资源开发利用的前列,全国大有星火燎原之势。大力开发富硒土壤资源,推动“富硒+生态+大健康”产业健康发展,是助力乡村振兴战略、健康中国战略的有效途径。

鉴于当前大部分地区富硒土壤资源开发不足,各地有必要加强富硒土壤资源、富硒农产品的调查,使富硒土壤资源开发利用与富硒农产品生产布局密切匹配。重点是立足富硒资源禀赋和区位优势,结合富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价,加快明晰富硒农业发展的方向、重点和空间布局,合理定位富硒农业产业发展功能分区,明确核心区、示范区、拓展区、辐射区,加快富硒农业发展规划工作;结合区域富硒农产品特色,明确“富硒水稻、富硒油茶、富硒茶叶、富硒中药材、富硒水果、富硒蔬菜、富硒畜禽养殖”等各类富硒农业生产区,加快农业结构调整和产业升级。坚持天然、有机的富硒产业发展理念,走“现代农业+富硒产业”的发展道路,促进“富硒+”功能农业、精深加工、休闲旅游、健康养生、现代物流等综合发展,实现“一业为主,多元发展”、“一主多辅,三产融合”,走上一条“天然安全、绿色生态、功能多样、优质高效、富民持久”的富硒产业发展道路。

4 结论与讨论

本研究将生态位理论及相关评价模型方法引入富硒土壤资源开发利用适宜性评价研究中:(1)通过定性分析与定量分析相结合、富硒土壤资源利用与富硒农业生产相结合,丰富了富硒土壤资源开发利用适宜性评价的研究方法,促进了富硒土壤资源开发利用理论与现代生态学理论的交叉融合,增强了富硒土壤资源开发利用适宜性评价的综合性和科学性,提高了区域富硒农业发展的方向性和目标性,为因地制宜地进行富硒土壤资源开发利用提供了系统性理论依据与研究思路,对于加快把富硒资源优势转化为资本优势具有重要的指导意义。(2)在多维超体积生态位理论的基础上,从土壤自身条件、土地利用和生态保护3个方面明确富硒土壤资源开发利用的主导因素、区位因素、限制因素,选择土壤硒含量、土壤有机质含量、地形坡度、土地利用类型、土地综合污染指数、生态保护建设等6个关键因子,构建富硒土壤资源开发利用适宜性评价体系;以最适生态位作为富硒土壤资源开发利用的适宜性评价标准,确定评价因子各级生态位分值,根据评价单元生态位适宜性综合指数采取自然断点法划定生态位适宜性等级,并通过聚类分析法进行生态位利用分区;结合土壤利用改良分区、土壤利用功能分区、富硒农业生产分区,探讨了区域富硒土壤资源开发利用适宜性分区目标与方向问题,对于促进区域富硒土壤资源科学合理利用具有重要的现实意义。

随着科学技术的不断进步及学科交叉研究的不断深入,生态位理论及模型方法得到了越来越广泛的利用。将富硒土壤资源开发利用比作一种生物行为,通过定性定量相结合讨论富硒土壤资源利用生态位适宜性问题,是对适宜性评价方法的新尝试,具有非常积极的一面,但也存在一些需要进一步探讨的问题:(1)生态位理论和模型方法本来就非常灵活,受到自然、经济、社会等多种因素的综合影响,如何构建科学有效的生态位适宜性评价指标体系,合理确定各评价因子最适生态位,完成生态位适宜性指数计算分析,需要做进一步的深入探索。(2)因研究区域大小尺度的不同,评价因子的选择及其生态位适宜性等级划分、各评价因子生态位理想值和最适生态位、各评价因子生态位对整个评价单元生态位适宜性的贡献率权重等也有所不同,如何把握好研究尺度与评价因子生态位适宜性的匹配问题,需要做进一步的深入研究。

参考文献(References):

- [1] 陈析羽,张浩,汤虎,黄凤洪.富硒食品的研究进展与展望.中国食物与营养,2018,24(6):11-14.
- [2] 段亮亮.硒的生理功能和富硒保健食品开发.现代食品,2018,(1):42-45.
- [3] Hughes D J, Fedirko V, Jenab M, Schomburg L, Méplan C, Freisling H, Bueno-de-Mesquita H B, Hybsier S, Becker N P, Czuban M, Tjønneland A, Outzen M, Boutron-Ruault M C, Racine A, Bastide N, Kühn T, Kaaks R, Trichopoulos D, Trichopoulou A, Lagiou P, Panico S, Peeters P H, Weiderpass E, Skeie G, Dagrud E, Chirlaque M D, Sánchez M J, Ardanaz E, Ljuslinder I, Wennberg M, Bradbury K E, Vineis P, Naccarati A, Palli D, Boeing H, Overvad K, Dorransoro M, Jakyszyn P, Cross A J, Quirós J R, Stepien M, Kong S Y, Duarte-Salles T, Riboli E, Hesketh J E. Selenium status is associated with colorectal cancer risk in the European prospective investigation of cancer and nutrition cohort. *International Journal of Cancer*, 2015, 136(5): 1149-1161.

- [4] Hatfield D L, Tsuji P A, Carlson B A, Gladyshev V N. Selenium and selenocysteine: roles in cancer, health, and development. *Trends in Biochemical Sciences*, 2014, 39(3): 112-120.
- [5] Rayman M P. The importance of selenium to human health. *The Lancet*, 2000, 356(9225): 233-241.
- [6] 蒋彬, 李志刚, 叶正钱, 杨肖娥. 硒从土壤向食物链的迁移. *土壤通报*, 2002, 33(2): 149-152.
- [7] 袁知洋, 郑金龙, 戴光忠, 杨良哲, 项剑桥. 恩施富硒土壤区土壤硒镉与其理化性质关系研究. *西南农业学报*, 2019, 32(8): 1852-1859.
- [8] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 菅桂芹, 李国成. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及其影响因素. *环境化学*, 2019, 38(10): 2306-2316.
- [9] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 809-816.
- [10] 周鑫斌, 于淑惠, 赖凡. 水稻品种间吸收和转运硒特性差异机制研究. *土壤学报*, 2014, 51(3): 594-599.
- [11] 郑雄伟, 洪波, 张元培, 徐景银, 郑国权, 罗军强, 王珊, 吴颖, 王成姣, 白洋, 魏凌霄, 胡青. 湖北省潜江市北部表层土壤硒元素分布特征及其影响因素探讨. *资源环境与工程*, 2019, 33(4): 486-490.
- [12] 迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 张久明, 魏丹, 宿庆瑞, 韩锦泽. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1262-1274.
- [13] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 张甘森, 赵其国, 黄铭洪. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素. *土壤学报*, 2005, 42(3): 404-410.
- [14] 吴正, 梁红霞, 陈富荣, 李明辉, 刘超, 李杨. 安徽省南陵地区土壤 Se 分布特征及评价研究. *山东国土资源*, 2019, 35(10): 32-37.
- [15] 王刚, 涂其军, 马宏超, 范磊善. 新疆温宿县富硒土地资源调查与评价. *新疆地质*, 2018, 36(4): 448-454.
- [16] 晏群, 杨兰芳, 沈峻, 张仁忠, 何文钦. 江汉平原富硒土壤资源调查及开发利用展望//2015 年中国农业资源与区划学会学术年会论文集. 西宁: 中国农业资源与区划学会, 2015.
- [17] 郦逸根, 董岩翔, 郑洁, 李琰, 吴小勇, 朱朝晖. 浙江富硒土壤资源调查与评价. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 323-330.
- [18] 余忠珍, 谢振东. 江西富硒土壤资源应用性生态地球化学评价基本思路及方法. *资源调查与环境*, 2013, 34(4): 261-269.
- [19] 王显炜, 梅晓波, 谢颖, 王晖, 陈恩科. 陕西咸阳某地富硒土地资源的可开发性初探. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1820-1826.
- [20] 万芸, 肖拥军, 唐嘉耀. 基于 AHP 和 FUZZY 的富硒康养旅游开发潜力评价——以湖北省建始县为例. *江苏农业科学*, 2019, 47(17): 40-45.
- [21] Bagheri Bodaghabadi M, Fakhodi A A, Salehi M H, Hosseinfard S J, Heydari M. Soil suitability analysis and evaluation of pistachio orchard farming, using canonical multivariate analysis. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 528-534.
- [22] 宋志超. 基于 RS 和 GIS 的白河县富硒茶园适宜性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [23] Liang R Y, Song S, Shi Y J, Lu Y L, Zheng X Q, Xu X B, Wang Y R, Han X S. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soils based on the analytic hierarchy process: assessment system construction and case demonstration. *Science of the Total Environment*, 2017, 605-606: 618-625.
- [24] 侯现慧, 王占岐, 杨俊. 富硒区耕地质量评价及利用分区研究——以福建省三元区为例. *资源科学*, 2015, 37(7): 1367-1375.
- [25] 郭笑东, 陈利根, 毕如田, 郭永龙, 原丽娟. 基于生态位理论的黄土丘陵区耕地整治优先度及模式研究. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 184-190.
- [26] 谭少军, 邵景安. 基于生态适宜性评价的西南丘陵区土地整治工程布局研究. *地理研究*, 2018, 37(4): 659-677.
- [27] 张荣群, 王大海, 艾东, 孙玮健, 侯振宇. 基于生态位和“反规划”思想的城市土地开发适宜性评价. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 258-264.
- [28] Yu Z W, Xiao L S, Chen X J, He Z C, Guo Q H, Vejre H. Spatial restructuring and land consolidation of urban-rural settlement in mountainous areas based on ecological niche perspective. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 131-151.
- [29] 赵素霞, 牛海鹏, 张捍卫, 张合兵, 张小虎. 基于生态位模型的高标准基本农田建设适宜性评价. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 220-228.
- [30] 念沛豪, 蔡玉梅, 谢秀珍, 张文新, 马世发. 基于生态位理论的湖南省国土空间综合功能分区. *资源科学*, 2014, 36(9): 1958-1968.
- [31] 秦天天, 齐伟, 李云强, 曲衍波. 基于生态位的山地农村居民点适宜度评价. *生态学报*, 2012, 32(16): 5175-5183.
- [32] 张宗耀, 董捷, 闫旭亮. 基于生态位适宜度的武汉市土地利用功能分区研究. *湖北农业科学*, 2015, 54(13): 3302-3306.
- [33] 叶长盛, 仲亚美, 孙丽, 李志文. 基于生态位模型的基塘利用适宜度评价. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 255-263.
- [34] 刘建国. 生态位理论的发展及其在农村生态工程建设中的应用原则. *农业现代化研究*, 1987, (6): 30-33.
- [35] 欧阳志云, 王如松, 符贵南. 生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用. *生态学报*, 1996, 16(2): 113-120.
- [36] 黄昌勇. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [37] 潘剑君. *土壤资源调查与评价*. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [38] 秦建成. 土壤适宜性评价方法研究——以重庆市彭水县植烟土壤为例[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [39] 鄯海满, 文帮勇, 王继强, 周强强, 刘冰权. 江西赣州梓山地区富硒土壤 重金属元素安全性评价. *华东地质*, 2017, 38(3): 234-240.
- [40] 夏琼, 高东升, 高雅, 张春雷, 查世新, 左洪发. 安徽省石台县富硒土壤资源调查与评价. *安徽地质*, 2017, 27(4): 314-316.
- [41] 蒙莉娜, 郑新奇, 赵璐, 邓婧. 基于生态位适宜度模型的土地利用功能分区. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 282-287.
- [42] 方婷婷, 程久苗, 费罗成. 繁昌县后备土地资源多宜性评价. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 750-757.
- [43] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 黄标, 孙维侠. 基于 GIS 的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因子分析. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1375-1384.