

doi: 10.12029/gc20230813003

任蕊, 晁旭, 张立君, 支倩, 徐翠玲, 凌丹丹, 马宇梅, 陈继平, 乔新星, 杜少喜. 2024. 富硒土地开发利用评价体系的建立及应用——以西安市临潼区为例[J]. 中国地质, 51(2): 676–688.

Ren Rui, Chao Xu, Zhang Lijun, Zhi Qian, Xu Cuiling, Ling Dandan, Ma Yumei, Chen Jiping, Qiao Xinxing, Du Shaoxi. 2024. Establishment and application of evaluation system for development and utilization of selenium-rich land: A case study in Lintong District, Xi'an[J]. Geology in China, 51(2): 676–688(in Chinese with English abstract).

富硒土地开发利用评价体系的建立及应用 ——以西安市临潼区为例

任蕊¹, 晁旭², 张立君³, 支倩¹, 徐翠玲⁴, 凌丹丹¹,
马宇梅¹, 陈继平¹, 乔新星¹, 杜少喜¹

(1. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省地质调查规划研究中心(陕西省地质勘查基金中心), 陕西 西安 710068; 3. 中国富硒产业研究院, 陕西 安康 725000; 4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:【研究目的】人体日常摄入的硒主要通过食物链源于土壤, 而中国是富硒土地资源相对匮乏的国家, 面对有限且珍贵的富硒土地资源, 亟需构建科学合理的富硒土地开发利用评价体系, 为特色土地资源的高效开发提供依据。【研究方法】本文以陕西关中地区为研究区, 在土地质量地球化学调查成果基础上, 融合反映农用地自然条件、基础设施水平的评价指标, 构建了涵盖立地条件、土壤硒含量、理化性质、土壤质量和土地管理等 5 大类 12 项指标的关中地区富硒土地开发利用评价体系。同时以西安市临潼区为例, 开展了临潼区富硒土地开发利用适宜性评价。【研究结果】将临潼区土地划分为高度适宜区、适宜区、较不适宜区、不适宜区和极不适宜区共 5 个等级, 其中高度适宜开发区及适宜区开发面积共 248.35 km², 主要分布在临潼区北部的新市乡、栎阳镇、徐杨乡、相桥镇及中东部的何寨镇。基于不同适宜评价区内小麦硒含量及富硒比例, 发现其富硒土地适宜性与小麦富硒程度高度耦合。【结论】说明构建的富硒土地开发利用评价体系对富硒土地资源的开发利用具有较好的科学指导价值及重要的示范意义。

关键词: 富硒土地; 开发利用; 评价体系; 农业地质调查工程; 临潼区; 关中地区

创新点: (1) 基于关中地区 1:25 万土地质量地球化学调查成果, 构建了突出硒资源的富硒土地开发利用评价体系。(2) 评价体系涵盖立地条件、土壤硒含量、理化性质、土壤质量和土地管理等 5 大类 12 项指标, 既满足了富硒农作物对土壤养分和环境质量的要求, 又充分考虑了其生长过程中对耕地立地条件、理化性质和土地管理的需求, 为农产品提质增效提供了全新思路。

中图分类号: F301.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0676-13

Establishment and application of evaluation system for development and utilization of selenium-rich land: A case study in Lintong District, Xi'an

REN Rui¹, CHAO Xu², ZHANG Lijun³, ZHI Qian¹, XU Cuiling⁴, LING Dandan¹,
MA Yumei¹, CHEN Jiping¹, QIAO Xinxing¹, DU Shaoxi¹

收稿日期: 2023-08-13; 改回日期: 2023-11-19

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目(202201、20180307)联合资助。

作者简介: 任蕊, 女, 1984 年生, 高级工程师, 主要从事农业地质、健康地质调查研究工作; E-mail: 877529793@qq.com。

通讯作者: 杜少喜, 男, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事矿产地质、健康地质调查研究工作; E-mail: 603107975@qq.com。

(1. Shaanxi Hydraulic Engineering and Environment Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Geological Survey Planning Center (Shaanxi Geological Survey Fund Center), Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. China Selenium Industry Research Institute, Ankang 725000, Shaanxi, China; 4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of agricultural geological survey engineering.

[Objective] Selenium (Se) intake in the human body primarily originates from the food chain, mostly derived from soil. The research aims to establish a scientific and rational evaluation system for the development and utilization of selenium-rich land due to the limited and valuable selenium-enriched soil resources in China. **[Methods]** This study focuses on the Guanzhong region, particularly Lintong District, integrating geophysical survey findings with assessment criteria reflecting agricultural land's natural conditions and infrastructure levels. The developed evaluation system encompasses five major categories and twelve indicators, including site conditions, soil selenium content, physicochemical properties, soil quality, and land management. Moreover, suitability assessment for selenium-rich land development and utilization was conducted in Lintong District as a case study. **[Results]** The land in Lintong District was categorized into five levels: highly suitable, suitable, moderately unsuitable, unsuitable, and highly unsuitable. The highly suitable and suitable development areas covered 248.35 km², mainly distributed in the northern areas of Lintong District, as Xinshi Town, Liyang Town, Xuyang Town, Xiangqiao Town, and the central-eastern parts of Hezhai Town. Analysis of wheat Se content and Se enrichment ratios within different suitability evaluation zones revealed a strong correlation between the suitability of selenium-rich land and the degree of selenium enrichment in wheat. **[Conclusions]** The developed evaluation system demonstrates significant scientific guidance and exemplary significance for the utilization of selenium-rich land resources. It underscores the need for a systematic approach to efficiently develop and utilize these resources, emphasizing the critical link between soil suitability and the selenium enrichment of agricultural produce.

Key words: selenium-rich land; development and utilization; evaluation system; agricultural geological survey engineering; Lintong District; Guanzhong region

Highlights: (1) Utilization of 1:25000 geophysical survey results in the Guanzhong region to establish an evaluation system highlighting selenium resources in selenium-rich land. (2) The comprehensive evaluation system includes five major categories and twelve indicators, meeting the nutrient and environmental quality requirements for selenium-rich crops while considering the demands of soil conditions, physicochemical properties, and land management, presenting a novel approach to enhance the quality and efficiency of agricultural products.

About the first author: REN Rui, female, born in 1984, senior engineer, mainly engaged in agricultural geology, health geological survey and research; E-mail: 877529793@qq.com.

About the corresponding author: DU Shaoxi, male, born in 1970, senior engineer, mainly engaged in mineral geology, health geological survey and research; E-mail: 603107975@qq.com.

Fund support: Supported by Shaanxi Province Public Welfare Geological Survey Projects (No.202201, No.20180307).

1 引言

硒作为与人体健康和生命有关的必需微量元素(赵其国等, 2018), 是人体多种酶类抗氧化剂的活性必要成分, 具有抗氧化、促生长、延缓衰老、保护心血管及提高机体免疫能力等生理作用(Rayman, 2012)。然而, 我国有约 51% 的地区存在不同程度的缺硒或少硒, 有 39%~61% 的人口日硒摄入量低于 WHO/FAO 的推荐标准(55 μg/d)(Ge and Yang, 1993; Dinh et al., 2018), 缺硒已经成为影响国民健

康的限制因子之一(任蕊等, 2023)。

研究认为土壤硒是人和动物体内硒的主要来源, 富硒土壤能够生产出天然富硒农产品, 并通过食物链将硒元素安全有效地转移到人体, 促进人体健康(李家熙等, 1999; 郦逸根等, 2005; Broadley et al., 2006)。针对富硒资源开发, 我国制定颁布了《富硒稻谷》(GB/T 22499-2008)、《天然富硒土地划定与标识》(DZ/T 0380-2021), 以及《富硒含硒食品与相关产品硒含量标准》(DB 61/T 556-2018)等多项标准, 这些标准主要规定了稻谷等农产品及土壤

中 Se 的含量阈值,为我国富硒土地资源开发与富硒农作物种植奠定了基础。

富硒土地资源开发除了与土壤硒含量有关外,还受到多种因素制约(徐雪生等, 2022)。比如,耕地立地条件对于耕地资源的利用环境和耕地资源的稳定性影响明显(Falco et al., 2010; Latruffe and Piet, 2014; 钱凤魁等, 2015; Sklenicka, 2016);土壤环境质量是保障我们“吃的安全”的前提(朱永官等, 2021);土壤养分对农作物的产量和品质形成具有重要作用(Dumanski and Pieri, 2000; 牛颖超等, 2018);土壤 pH 代表土壤的酸碱度,其直接影响土壤养分的有效性(张江周等, 2022);土壤质地是土壤重要的物理特性之一,严重影响土壤的持水、通气等特性(吴克宁和赵瑞, 2019)。因此,构建科学合理的富硒土地资源开发利用评价体系,不仅对特色土地资源的开发、保护及可持续发展意义重大,更能满足我国日益增长的对农产品质量、安全及多功能的需求。

陕西省土地质量地球化学评价结果显示,关中地区土壤硒含量丰富且有效硒含量高(任蕊等, 2018; Liu et al., 2021),具有发展富硒农业的资源优势;同时其作为古丝路东方起点,更兼具“一带一路”区位优势。目前,陕西农业正处于“以量取胜”向“以质增值”的提升阶段(孙矿玲, 2021),富硒农业作为现代农业的重要组成部分,为农产品提质增效提供了全新思路,是农业供给侧结构性改革的重要路径,可同时助力陕西省“乡村振兴”战略和“健康陕西”行动。本研究以关中地区为研究区,从立地条件、土壤硒含量、理化性质、土壤质量和土地管理 5 个方面,构建富硒土地开发利用评价体系,并以西安市临潼区为例,对评价结果进行说明,以期对陕西省乃至全国的富硒土地资源高效开发利用提供参考和借鉴。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,西起宝鸡、东至潼关,南接秦岭,北到陕北高原,包括西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、韩城市和杨凌示范区,面积为 39500 km²(图 1)。研究区地貌类型相对单一,主要以渭河冲积平原和渭北台塬为主,其次在陇

县、千阳、临潼等地分布低山丘陵;土壤类型多样,以黄绵土、褐土为主(赵业婷, 2015),其次为新积土、黑垆土、粗骨土、潮土、红土、风沙土、水稻土等;土壤质地自北向南呈黏土—壤土—砂土分布,此外在黄河、渭河及其支流泾河、洛河等沿岸分布着砾质土;土地利用类型以耕地(水浇地分布在渭河冲积平原,旱地分布在渭北台塬)为主,其次为林地、草地,另有小面积园地、水田和沙地;土壤有机质含量介于 0.11%~8.50%,平均值为 1.48%,全区缺乏、较缺乏、中等、较丰富和丰富 5 种类型的土壤均有分布,其中较缺乏的土壤面积占比最大,是总面积的 83.30%;土壤 pH 变化范围 5.06~9.13,中值为 8.21,全区强酸性、酸性、中性、碱性和强碱性 5 种类型的土壤均有分布,其中碱性土面积占比最大,是总面积的 92.09%(任蕊等, 2021^①)。受大陆季风气候影响,区内四季分明,日照充足,年平均气温为 12~13℃,年平均降水量 550~750 mm,是中国重要的商品粮产区。

临潼区位于关中中部偏东,地理坐标为:34°16'49"~34°44'11"N, 109°05'49"~109°27'50"E。东与渭南市相邻,西与灞桥区、高陵区、三原县接壤,南邻蓝田,北至富平,总面积 915 km²,辖 23 个街道,总人口 70 多万,其中农业人口 56.2 万。区内山清水秀,土地肥沃,气候适宜,物产丰富。基底属渭河中断陷的一部分,县境内受秦岭东西构造带和新华夏系(NNE)构造体系的主导控制作用的影响(陕西省临潼县志编纂委员会, 1991),除形成渭河中断陷盆地外,盆地内又产生了一系列次一级的断块,从而形成了特殊的地壳结构、复杂的地层成分、丰富的地热资源以及山川台塬俱全的地貌特点。

2.2 数据来源

本次富硒土地资源开发利用评价涉及的数据包括:陕西省 1:25 万土地质量地球化学调查成果数据 14.16 万个,陕西省第二次国土调查地块 57.16 万个,以及陕西省农用地分等项目成果。其中临潼区土地质量地球化学调查成果数据 3318 个,第二次国土调查地块 21550 个。

3 富硒土地开发利用评价体系

富硒土地开发利用评价成果以服务关中地区富硒农业发展为主要目标,故本次评价以便于地方

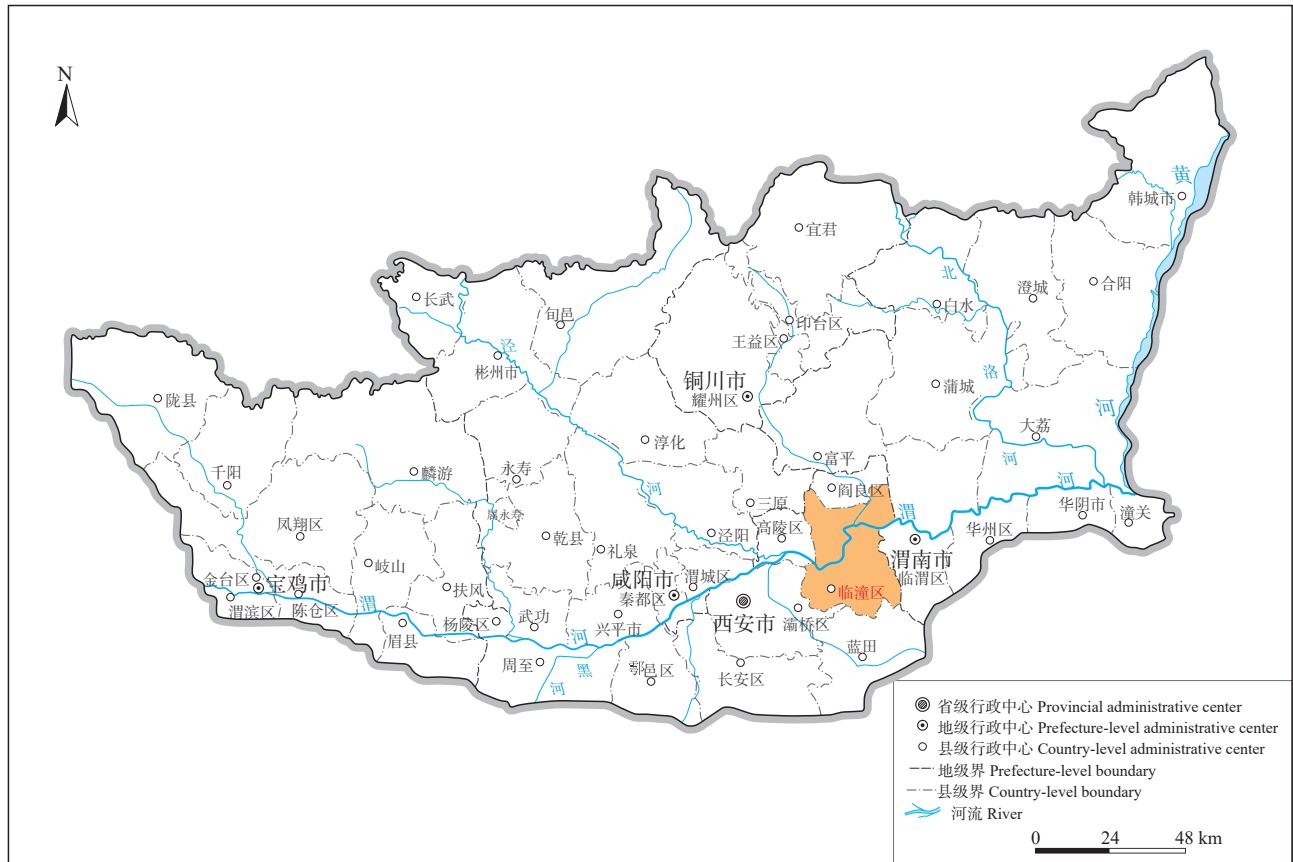


图 1 关中地区行政区划图

Fig.1 Administrative division of Guanzhong region

政府使用的土地利用图斑为最小评价单元,首先,将研究区土地质量地球化学调查数据与土地利用图斑整合,形成研究区空间属性一体化数据库。在此基础上,开展研究区富硒土地开发利用评价。评价流程为:选取评价指标→确定指标权重→量化评价指标→综合评价。

3.1 选取评价指标

借鉴关中地区以往开展的土地质量地球化学评价、农用地分等定级等土地资源评价成果,立足富硒土地开发利用中对土壤养分、环境质量的基本要求,充分考虑优质富硒农作物生长中对耕地立地条件、理化性质、土地管理的需求,同时遵循数据的重要性、代表性、易获取性、差异性及其可比性等原则(余锦鹏, 2015; 吴冠华, 2019),确定本研究的评价指标。

(1)立地条件。耕地的立地条件是代表耕地质量的重要内容,其主要表现为与耕地生产力相关的地形地貌特征(闫一凡等, 2014)。由于研究区地貌

类型单一,土壤类型多样,加之渭北大部分土壤紧实度较大(樊会敏等, 2017),局部存在土壤盐渍化现象,同时地块作为最小评价单元,面积越大,利用的意义和保护的价值就越高,故选择地形坡度、土壤类型、盐渍化程度及地块大小作为立地条件的 4 个指标因子。

(2)土壤硒含量。土壤全硒含量直接决定着土地是否具有开发为富硒资源的价值,土壤有效硒含量直接影响着植物中硒的含量。然而,关中地区以往面积性调查工作中并未涉及对土壤有效硒含量的检测,想要全面掌握该含量值,不仅需要投入大量的经济成本,还需要承受相应的劳动负担。为了决定这个问题,任蕊等(2021^①)采用单因素方差分析法,发现关中地区土壤硒含量对当地小麦、玉米、菜花、甘蓝等 12 种主要农作物硒含量具有显著影响。故采用土壤全硒含量作为表征土地硒含量的唯一指标因子。

(3)土壤理化性质。植物硒是人畜摄入硒的主

要来源,其含量与土壤硒含量及有效性关系密切(Peng et al., 2016; Wang et al., 2017)。土壤理化性质影响着硒在土壤中存在的形态,进而对土壤硒的有效性产生影响(Li et al., 2015; Eswayah et al., 2016; Fan et al., 2018),关中地区硒的生物有效性及其主控因子研究发现,土壤 pH 和有机质是影响土壤硒生物有效性的主控因子,且呈正效应。此外耕层土壤质地的沙黏、粗细是影响土壤水分、通气、养分及土壤耕性的重要因子。故本研究选择土壤 pH、有机质及质地作为土壤理化性质的 3 个指标因子。

(4) 土壤质量。依据《土地质量地球化学评价》(DZ/T 0295-2016)中相关规定,确定土壤养分和土壤环境为土壤质量的 2 个指标因子,其中土壤养分指标包括氮、磷、钾,权重系数分别为 0.4、0.4 和 0.2;土壤环境指标包括镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌,环境得分等同于 8 种元素中的最低分。

(5) 土地管理。土地管理是现代农业发展的第一推动力,包含农田基础设施和灌溉排水等指标。水资源条件是农作物生长的保障性因素,是农业健康、可持续发展重要保证,因此选择灌溉保证率反映耕地的水资源条件(侯现慧等, 2015)。排水条件

是指农田排水系统工程满足农田排除地面积水、控制地下水位需求的程度,是耕地质量等级评价的重要指标之一。因此,选择灌溉保证率和排水条件作为土地管理的 2 个指标因子。

3.2 确定指标权重

评价指标的权重大小直接影响到评价结果的正确性。层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是将与决策相关的元素分解成目标、准则、指标等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法(刘朝亮, 2013; 高蓓等, 2015; 韩慧杰等, 2019),具有灵活、简洁、系统等特点,目前被广泛应用于各个行业与领域。本次评价工作采用层次分析法来确定指标权重,首先将富硒土地开发利用评价作为目标层(A),把影响目标层的立地条件、土壤硒含量、土壤理化性质、土壤质量和土地管理作为准则层(B),依次划分出 3 个层次,构建研究区富硒土地开发利用评价层次模型(表 1)。

评价层次模型构建后,利用德尔菲法(Delphi)辅以文献研究法,对各层次指标的重要性量化打分,基于打分结果,构建各层次判断矩阵(表 2, 表 3)。采用 Matlab 数学软件对各矩阵进行一致性检验并计算指标权重(郭金玉等, 2008; 居宇龙等, 2022)。

表 1 研究区富硒土地开发利用评价层次模型

Table 1 Hierarchical model of evaluating the development and utilization of Selenium-rich land in the study area

目标层 (A)	准则层 (B)	指标层 (C)
关中地区富硒土地开发利用评价体系	立地条件	地块大小
		盐渍化程度
		土壤类型
		地形坡度
	土壤硒含量	土壤全硒含量
	土壤理化性质	土壤质地
		有机质
		pH 值
土壤质量	土壤养分 (氮、磷、钾)	
	土壤环境 (镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌)	
土地管理	排水条件	
	灌溉保证率	

表 2 准则层对目标层的比较判断矩阵 A 及权重向量

Table 2 Comparison matrix A and weight vector of the criterion layer to the target layer

A	立地条件	理化性质	土壤质量	土壤硒含量	土地管理	权重向量
立地条件	1	1/5	1/3	1/7	2	0.0586
理化性质	5	1	2	1/3	7	0.2419
土壤质量	3	1/2	1	1/5	5	0.1406
土壤硒含量	7	3	5	1	9	0.5227
土地管理	1/2	1/7	1/5	1/9	1	0.0362

表 3 立地条件指标对准则层的比较判断矩阵 B1 及权重向量

B	地块大小	盐渍化程度	土壤类型	地形坡度	权重向量
地块大小	1	3	1/3	5	0.2622
盐渍化程度	1/3	1	1/5	3	0.1175
土壤类型	3	5	1	7	0.5650
地形坡度	1/5	1/3	1/7	1	0.0553

一致性检验通过后,各指标的组合权重为其所在准则层权重与准则层对目标层权重的乘积,见表 4。

3.3 量化评价指标

本次选择的 12 项评价指标,根据收集的数据类型可分为定量指标、定性指标 2 类。定量指标包括:地块大小、地形坡度、土壤有机质、土壤 pH 值、土壤养分(氮、磷、钾)、土壤环境(镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌)和土壤硒含量,其中,地块大小源自陕西省第二次国土调查,地形坡度采用 ArcGIS 软件提取研究区范围内的数字高程模型(DEM)数据,其他数据源自陕西省土地质量地球化学调查项目;定性指标包括:盐渍化程度、土壤类型、土壤质地、排水条件和灌溉保证率,除土壤类型源自《陕西土壤》(郭兆元等, 1992)外,其他数据源自陕西省农用地分等项目。

定量指标主要根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)中提供的隶属函数模型,对其进行无量纲化;定性指标则根据指标的级别情况赋予其相应的分值。所有指标的赋分范围均在 0~1。

3.3.1 量化定量指标

由于各评价指标含量的差异,因此如何将各指标纳入同一评价体系是至关重要的。隶属函数作

为表征模糊集合的数学工具,可以将不同单位的指标纳入同一评价体系中,进行综合评价,其在大气环境质量评价、地表水质评价、耕地、农用地土壤质量评价等方面已经得到了广泛的应用。本研究就采用隶属函数模型对定量指标进行评价。

(1) 确定隶属度函数模型

隶属函数模型主要包括线性和非线性模型,考虑评价工作的实用性和简洁性,本研究以线性模型为基础,采用峰值型、戒上型、戒下型模型,对应的隶属函数计算公式也简洁易懂(图 2)。各类定量指标采用隶属函数模型的原则为:

地块大小、土壤硒含量、有机质、土壤养分(氮、磷、钾)均采用戒上型隶属度函数模型;

土壤 pH 值采用峰值型隶属度函数模型;

地形坡度、土壤环境(镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌)均采用戒下型隶属度函数模型。

(2) 计算隶属函数界限值

利用 SPSS 软件统计研究区各评价指标,对于不服从正态分布或对数正态分布的数据,进行平均值 ± 3 倍离差剔除异常数据,直至服从正态分布或对数正态分布。对服从正态分布或对数正态分布的数据,按照 20%、40%、60%、80% 的累积频率值将各指标进行分级,然后将界限值填入对应指标的函

表 4 富硒土地开发利用评价指标权重表

项目	立地条件	理化性质	土壤质量	土壤硒含量	土地管理	组合权重
	0.0585	0.2419	0.1406	0.5227	0.0362	
地块大小	0.2622					0.0154
盐渍化程度	0.1175					0.0069
土壤类型	0.5650					0.0331
地形坡度	0.0553					0.0032
土壤质地		0.1047				0.0253
有机质		0.2583				0.0625
pH 值		0.6370				0.1541
土壤养分			0.5000			0.0703
土壤环境			0.5000			0.0703
土壤硒含量				1.0000		0.5227
排水条件					0.1667	0.0060
灌溉保证率					0.8333	0.0302

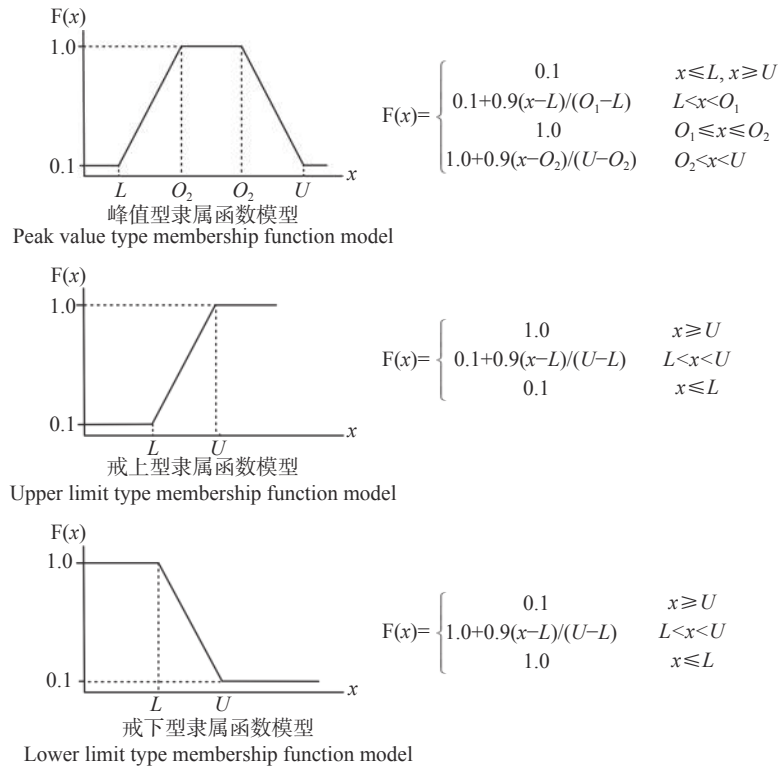


图2 定量指标隶属函数模型及隶属值计算公式

U —评估指标的上限值; L —评估指标的下限值; O_1 、 O_2 —评估指标的最优值; x —评估指标的测定值

Fig.2 Membership function model and calculation on membership value of quantitative index

U —The upper limit of evaluation index; L —The lower limit of evaluation index; O_1 、 O_2 —The optimal value of evaluation index; x —The measured value of evaluation index

数模型中,构成各指标的隶属度函数。其中研究区土壤硒含量 80% 累频值为 0.20 mg/kg,考虑到本次评价的目的,采用《陕西省关中地区碱性富硒土地开发利用综合研究》(任蕊等, 2021^[1])中确定的富硒土壤下限值 0.22 mg/kg 为指标的上限值(U);研究发现,在碱性土壤中硒多以硒酸盐形式存在,水溶性较高,容易被植物吸收利用(Winkel et al., 2012; Peng et al., 2017),故 pH 的最优值(O_1 、 O_2)分别取 7.5 和 8.5,下限值(L)取 6.5,由于研究区 pH 值最大为 9.13,故上限值(U)取 9.0;地形坡度方面,参考《农用地质量分等规程》(GB/T 28407-2012)中推荐的分级界限,确定地形坡度的下限值(L)取 2°,上限值(U)取 25°。各指标隶属函数的界限值见表 5。

3.3.2 量化定性指标

本次参与评价的定性指标包括盐渍化程度、表层土壤质地、排水条件、灌溉保证率及土壤类型共 5 项,其中前 4 项的打分参考《农用地质量分等规

程》(GB/T 28407-2012),土壤类型的打分参考任蕊等(2018)、姬华伟等(2021)在研究关中地区不同类型土壤全硒含量及其有效硒含量时,发现褐土、新积土、潮土和水稻土较其他土壤的全硒含量高,且褐土的有效硒含量显著高出其他土壤。各指标的分级及分值见表 6。

3.4 综合评价

3.4.1 计算综合指数

(1)依据前述评价指标层次模型、隶属函数值计算模型和权重赋值结果,采用加法模型,获得富硒土地开发利用综合指数。

各评价指标的综合指数计算公式为:

$$P = \sum f_i \times C_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: P 为综合指数; f_i 为第 i 个评估指标的隶属函数值; C_i 为第 i 个评估指标的权重。

(2)根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中规定的风险

表 5 各评价指标隶属度函数界限值

Table 5 Threshold values of membership functions of all evaluation indexes

指标	函数类型	界限值	指标	函数类型	界限值
地块大小	戒上型	$U=12385.6$ $L=1518.0$	土壤环境—锌	戒下型	$U=79.0$ $L=66.8$
土壤硒含量	戒上型	$U=0.22$ $L=0.13$	土壤环境—铜	戒下型	$U=28.95$ $L=23.94$
有机质	戒上型	$U=1.76$ $L=1.19$	土壤环境—镍	戒下型	$U=35.60$ $L=30.12$
土壤养分—氮	戒上型	$U=1024$ $L=740$	土壤环境—砷	戒下型	$U=14.40$ $L=12.30$
土壤养分—磷	戒上型	$U=1058$ $L=733$	土壤环境—镉	戒下型	$U=208$ $L=160$
土壤养分—钾	戒上型	$U=2.17$ $L=1.94$	土壤环境—铬	戒下型	$U=77.9$ $L=70.6$
pH值	峰值型	$L=6.5; O_1=7.5$ $O_2=8.5; U=9.0$	土壤环境—汞	戒下型	$U=74.00$ $L=27.73$
地形坡度	戒下型	$U=25$ $L=2$	土壤环境—铅	戒下型	$U=27.1$ $L=22.4$

注: 地块大小单位为 m^2 ; 有机质、钾单位为%; pH值无量纲; 地形坡度单位为 $^\circ$; 镉、汞单位为 $\mu g/kg$; 其他指标单位为 mg/kg 。

表 6 各评价指标分级、得分

Table 6 Grading and score of all evaluation indexes

指标名称	分级标准	等级	得分
盐渍化程度	无盐渍化	1级	1
	轻度盐渍化	2级	0.7
	中度盐渍化	3级	0.4
	重度盐渍化	4级	0.1
表层土壤质地	壤土	1级	1
	黏土	2级	0.7
	砂土	3级	0.4
	砾质土	4级	0.1
排水条件	排水体系健全	1级	1
	排水体系基本健全	2级	0.9
	排水体系一般	3级	0.7
	无排水体系	4级	0.5
灌溉保证率	充分满足	1级	1
	基本满足	2级	0.8
	一般满足	3级	0.5
	无灌溉条件	4级	0.1
土壤类型	褐土	1级	1
	新积土、潮土、水稻土	2级	0.7
	黄绵土、黑垆土、风沙土、沼泽土、棕壤	3级	0.4
	粗骨土、红土、石质土	4级	0.1

筛选值, 对各地块镉、汞、砷等 8 种元素含量进行比较, 如果该地块中 8 种元素的含量均未超过风险

筛选值, 则地块的综合指数不变; 如果有 1 种元素的含量大于风险筛选值, 则地块的综合指数变为 0.1, 即认为该地块不适宜开发绿色富硒农产品。

3.4.2 划分综合指数等级

计算出关中地区各个地块的综合指数后, 选用累积频率曲线法, 按照 10%、30%、70%、90% 对地块进行富硒土地开发适宜性评价。关中地区富硒土地开发利用综合指数等级见表 7。






4 应用

4.1 临潼区评价结果

临潼区富硒土地开发利用适宜性评价结果显示(图 3, 表 8), 高度适宜区面积 112.08 km^2 , 占全区农用地面积的 19.84%, 集中分布在临潼区西北部新市乡、栎阳镇、徐杨乡等地, 此外在临潼区西南部麦王一椿树一带也有小面积分布。这些地区拥有综合性能最好的耕地, 土壤硒平均含量为 0.27 mg/kg , 是关中富硒土壤下限值 0.22 mg/kg 的 1.23 倍, 田地平整, 易于耕作, 灌溉方便, 土壤环境质量清洁, 土壤类型为褐土、pH 为碱性(8.07~8.35), 适于富硒农

表 7 关中地区富硒土地开发利用综合指数等级

Table 7 Comprehensive index grades of Selenium-rich land development and utilization in Guanzhong Region

综合指数	> 0.77	0.68~0.77	0.51~0.68	0.37~0.51	≤ 0.37
等级	一等	二等	三等	四等	五等
含义	高度适宜	适宜	较不适宜	不适宜	极不适宜
颜色					
R : G : B	0 : 176 : 80	146 : 208 : 80	255 : 255 : 0	255 : 192 : 0	255 : 0 : 0

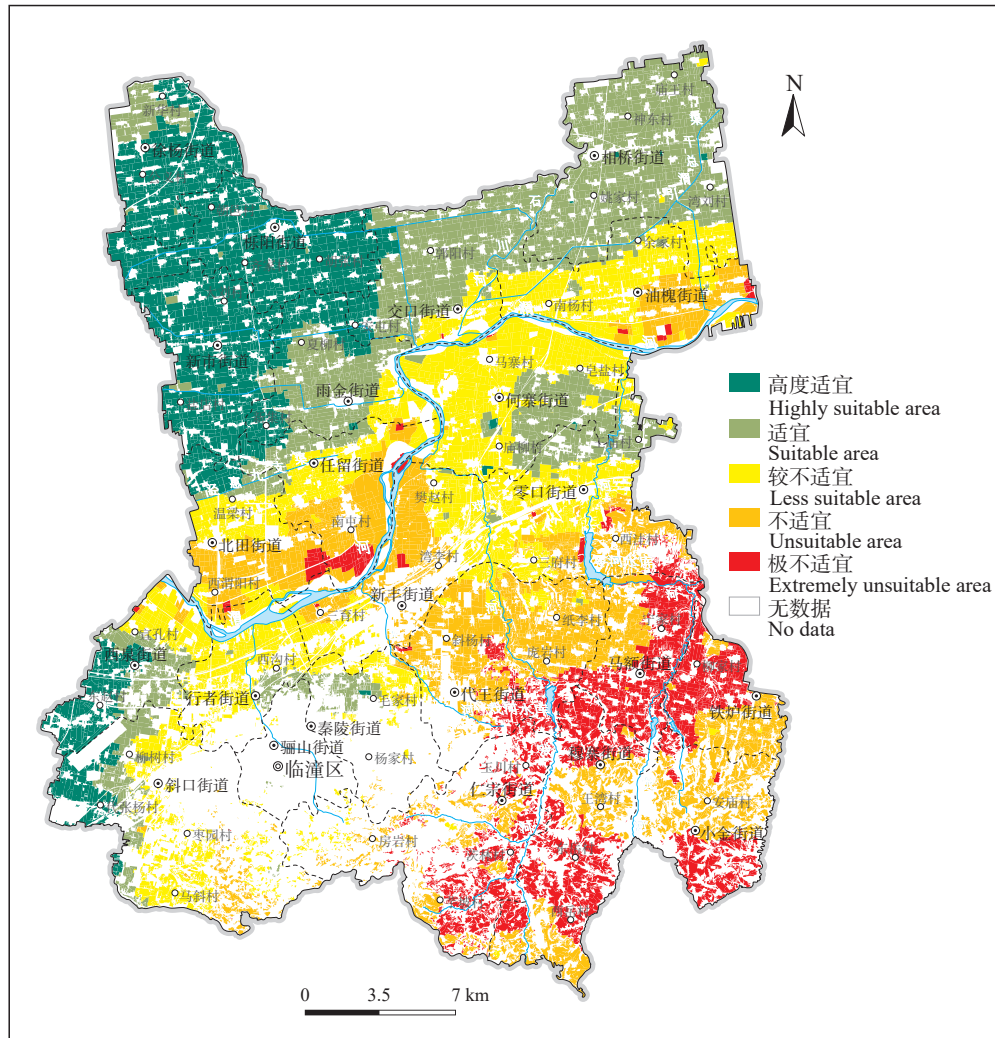


图3 临潼区富硒土地开发利用适宜性评价图

Fig.3 Suitability evaluation for the exploitation and utilization of Selenium-rich land in Lintong district

作物生长,十分适宜发展富硒产业(图4)。

适宜区面积 136.27 km², 占总面积的 24.12%, 主要分布在临潼区北部的相桥镇、交口镇及中东部的何寨镇,此外在西南部的西泉镇一带也有少量分布。这些地区土壤硒平均含量为 0.25 mg/kg,立地条件较好,田地平整,易于耕作,土壤类型、质地等

均适宜富硒农作物生长,灌溉能力和排涝能力较好,但个别地区土壤 pH 较高。

较不适宜区、不适宜区、极不适宜区面积分别占到 23.84%、21.02%、11.18%,主要分布在临潼区的中部和东南部。这些地区土壤硒含量较低,地块面积相对较小,地形坡度较大,灌溉能力一般,认为

表8 临潼区富硒土地开发利用适宜性评价统计

Table 8 Statistics of suitability evaluation of Selenium-rich land development and utilization in Lintong district

等级	开发利用适宜性	综合指数	地块数/个	面积/km ²	地块平均面积/km ²	土壤硒平均值/(mg/kg)	地形坡度<2°地块占比/%	有灌溉条件地块占比/%
一级	高度适宜	> 0.77	2866	112.08	0.039	0.27	98.26	93.58
二级	适宜	0.68~0.77	4464	136.27	0.031	0.25	94.62	90.59
三级	较不适宜	0.50~0.68	5651	134.71	0.024	0.19	77.10	74.50
四级	不适宜	0.37~0.50	5270	118.79	0.023	0.16	48.99	39.28
五级	极不适宜	≤ 0.37	3299	63.18	0.019	0.15	25.40	18.70

不适宜发展富硒产业。

4.2 农作物富硒率验证

参照《富硒含硒食品与相关产品硒含量标准》(DB 61/T 556-2018)中的富硒粮食的定义,分类统计出不同适宜性评价区内小麦硒含量特征及富硒比例,分析统计结果见表 9。

由表 9 可知,高度适宜区中小麦硒平均值 0.162 mg/kg,富硒比例高达 94.55%;适宜区中小麦硒平均值 0.313 mg/kg,富硒比例为 85.51%;较不适

宜区小麦硒平均值 0.108 mg/kg,富硒比例为 42.86%;不适宜区小麦硒平均值 0.028 mg/kg,富硒比例为 0%。由此可见,农作物富硒率评价结果与富硒土地适宜性评价等级相吻合。综上,认为构建的富硒土地开发利用评价体系对富硒土地资源的开发利用具有较好的科学指导价值及重要的示范意义。

5 讨论

以往关中地区较为系统的土地资源评价工作

表 9 临潼区不同适宜性评价区的小麦硒含量特征值及富硒比例统计

Table 9 Statistics of Selenium content eigenvalue and Selenium enrichment ratio of wheat in areas with different suitability evaluations of Lintong district

评价等级	小麦样品数/件	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准差	变异系数	DB 61/T 556-2018	
							富硒范围/(mg/kg)	富硒比例/%
高度适宜	55	0.031	0.528	0.162	0.110	0.678	≥ 0.05	94.55
适宜	69	0.034	1.395	0.313	0.313	0.998		85.51
较不适宜	7	0.026	0.265	0.108	0.089	0.831		42.86
不适宜	1	0.028	0.028	0.028	0.000	0.000		0.00
极不适宜	0	—	—	—	—	—		—

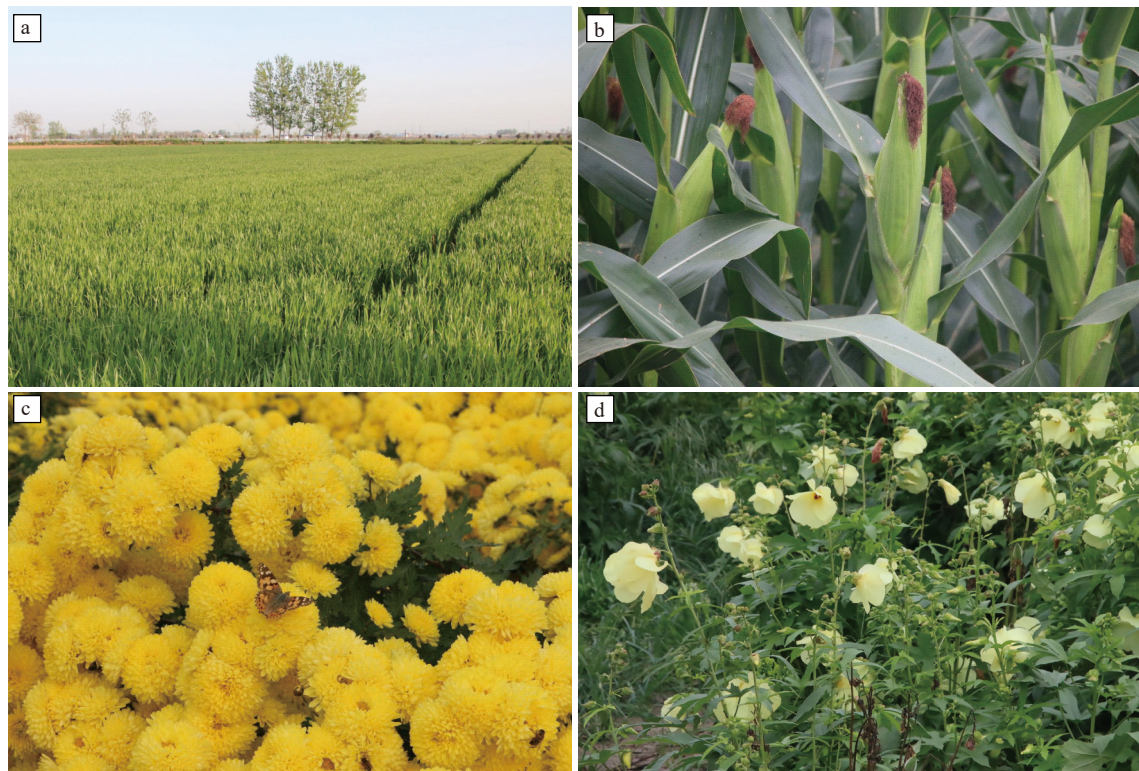


图 4 富硒农作物(照片源自陕西省富硒农作物种植示范基地建设项目)

a—小麦; b—玉米; c—菊花; d—金花葵

Fig.4 Selenium-rich crops (Photo from the construction project of selenium-rich crop planting demonstration base in Shaanxi Province)

a—Wheat; b—Corn; c—Chrysanthemum; d—Aurea helianthus

主要包括陕西省土地质量地球化学评价、陕西省农用地分等定级等,前者侧重于从地球化学的角度反映土壤肥力、环境和健康因素对土地功能的影响程度,但评价结果未能全面反映土地这一自然经济复合体的整体质量;后者侧重于对农用地的自然质量、利用及效益水平进行评价,很少考虑污染因素及特色资源对农用地质量造成的负向或正向影响(赵华甫等, 2021)。本文提出的富硒土地开发利用评价体系立足关中地区富硒土地资源禀赋,既满足了富硒农作物对土壤养分和环境质量的要求,又充分考虑了其生长过程中对耕地立地条件、理化性质等自然要素的需求,同时,还考虑了土地管理等农事活动,因此,本评价体系更为突出重点、系统全面。从评价结果上看,划分的富硒土地开发利用综合等级能较好反映当地土壤硒含量水平、环境质量、立地条件等,与农产品的富硒程度也高度耦合,可为当地政府对富硒土地资源的高效开发提供决策依据(图 4)。

6 结论

(1)本文以利于政府使用的土地利用图斑作为最小评价单元,科学选取了包括地块大小、盐渍化程度、土壤类型、地形坡度、土壤质地、有机质、pH 值、土壤养分、土壤环境、土壤硒含量、排水条件、灌溉保证率等 12 项指标,建立了关中地区富硒土地开发利用评价体系,实现了对富硒土地开发利用潜力的量化评价。

(2)以西安市临潼区富硒土地开发利用评价为例,将当地土地划分为高度适宜区、适宜区、较不适宜区、不适宜区和极不适宜区共 5 个等级,其中高度适宜区面积 112.08 km²,主要分布在临潼区西北部新市乡、栎阳镇、徐杨乡等地。适宜区面积 136.27 km²,主要分布在临潼区北部的相桥镇、交口镇及中东部的何寨镇。

(3)对临潼区各评价区中的小麦样品进行小麦籽粒富硒率评价,发现小麦籽粒评价结果与富硒土地适宜性评价等级高度耦合,认为该富硒土地开发利用评价体系对富硒土地资源的开发利用具有较好的科学指导价值。

致谢:感谢中国地质大学(北京)杨忠芳教授、余涛教授对本文稿件提出的宝贵意见和建议。

注释

①任蕊,陈继平,姬华伟,乔新星,张志敏,李傲瑞,冯伟华,张亚丽. 2021. 陕西省关中地区碱性富硒土地开发利用综合研究[R]. 西安: 陕西省水工环地质调查中心.

References

- Broadley M R, White P J, Bryson R J, Meacham M C, Bowen H C, Johnson S E, Hawkesford M J, McGrath S P, Zhao F J, Breward N, Harriman M, Tucker M. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65: 169–181.
- Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, Tran T A T, Wang D, Yang W X, Zhou F, Wang M K, Yu D S, Liang D L. 2018. Selenium distribution in the chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. *Environment International*, 112: 294–309.
- Dumanski J, Pieri C. 2000. Land quality indicators: Research plan[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 81(2): 93–102.
- Eswayah A S, Smith T J, Gardiner P H E. 2016. Microbial transformations of selenium species of relevance to bioremediation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 82: 4848–4859.
- Falco S D, Penov I, Aleksiev A, Van Rensburg T M. 2010. Agrobiodiversity, farm profits and land fragmentation: Evidence from Bulgaria[J]. *Land Use Policy*, 27(3): 763–771.
- Fan Huimin, Xu Mingxiang, Li Binbin, Zhang Rongrong, Zhang Shengmin, Ma Luyang. 2017. Influence of soil physical properties on salt content in soil profile of farmland in Weibei region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(4): 198–204 (in Chinese with English abstract).
- Fan J X, Zeng Y, Sun J X. 2018. The transformation and migration of selenium in soil under different Eh conditions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 18: 2935–2947.
- Gao Bei, Wei Haiyan, Guo Yanlong, Gu Wei. 2015. Potential distribution of *Amorphophallus rivieri* in the Qinling mountains based on analytic hierarchy process and geographic information system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(21): 7108–7116 (in Chinese with English abstract).
- Ge K, Yang G. 1993. The epidemiology of selenium deficiency in the etiological study of endemic diseases in China[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 57(Suppl.): 259–263.
- Guo Jinyu, Zhang Zhongbin, Sun Qingyun. 2008. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. *China Safety Science Journal*, 18(5): 148–153 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaoyuan, Huang Zili, Fenglixiao. 1992. Soil of Shaanxi Province[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Han Huijie, Xia Xueqi, Wu Haidong, Tang Ming, Jiang Mingliang. 2019. Evaluation of rice planting suitability using GIS and geochemical land quality data: A case study of Qingyang County, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 27(4):

- 591–600 (in Chinese with English abstract).
- Hou Xianhui, Wang Zhanqi, Yang Jun. 2015. Cultivated land quality evaluation using partition in the Selenium-rich Area of Sanyuan, Fujian Province[J]. *Resources Science*, 37(7): 1367–1375 (in Chinese with English abstract).
- Ji Huawei, Ren Rui, Chen Jiping, Zhang Jijun, Li Aorui, Feng Huawei. 2021. Characteristics of selenium content in different soil types in Guanzhong and its influence on selenium content of corn grain[J]. *Northwestern Geology*, 54(4): 239–249 (in Chinese with English abstract).
- Ju Zilong, Hu Shangjun, Chen Si, Yin Meng, Xia Kun, Wan Xiang. 2022. Research progress and evaluation methods of health geological survey[J]. *Resources Environment and Engineering*, 36(5): 594–603 (in Chinese with English abstract).
- Latruffe L, Piet L. 2014. Does land fragmentation affect farm performance? A case study from Brittany, France[J]. *Agricultural Systems*, 129: 68–80.
- Li Jiayi, Huang Huaizeng, Liu Xiaorui. 1999. The application of environmental geochemistry to agriculture and life science[J]. *Quaternary Sciences*, 19(3): 224–230 (in Chinese with English abstract).
- Li Yigeng, Dong Yanxiang, Zheng Jie, Li Yan, Wu Xiaoyong, Zhu Chaohui. 2005. Selenium: Abundant soil survey and assessment in Zhejiang[J]. *Quaternary Sciences*, 25(3): 323–330 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Wu L H, Zhang H, Luo Y M, Christie P. 2015. Effects of soil drying and wetting–drying cycles on the availability of heavy metals and their relationship to dissolved organic matter[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 15: 1510–1519.
- Lintong County Annals Compilation Committee of Shaanxi Province. 1991. *Lintong County Annals*[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House (in Chinese).
- Liu N N, Wang M, Zhou F, Zhai H, Qi M X, Liu Y, Li Y N, Zhang N C, Ma Y Z, Huang J, Ren R, Liang D L. 2021. Selenium bioavailability in soil–wheat system and its dominant influential factors: A field study in Shaanxi Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 770: 144664.
- Liu Zhaoliang. 2013. Study on application of AHP in agricultural system[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(13): 228–232 (in Chinese with English abstract).
- Niu Yingchao, Zhou Zhongfa, Wang Li, Dan Yusheng, Feng Qian. 2018. Comprehensive evaluation of soil nutrients in Guizhou agricultural products areas based on the fractal interpolation model[J]. *Environmental Chemistry*, 37(10): 2207–2218 (in Chinese with English abstract).
- Peng Q, Guo L, Ali F, Li J, Qin S Y, Feng P Y, Liang D L. 2016. Influence of Pak choi plant cultivation on Se distribution speciation and bioavailability in soil[J]. *Plant Soil*, 403: 331–342.
- Peng Q, Wang M K, Cui Z W, Huang J, Chen C, Guo L. 2017. Assessment of bioavailability of selenium in different plant–soil systems by diffusive gradients in thin–films (DGT)[J]. *Environmental Pollution*, 225: 637–643.
- Qian Fengkui, Wang Qiubin, Li Na. 2015. High–standard prime farmland planning based on evaluation of farmland quality and site conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(18): 225–232 (in Chinese with English abstract).
- Rayman M P. 2012. Selenium and human health[J]. *Lancet*, 379: 1256–1268.
- Ren Rui, Wang Mingxia, Chen Jiping, Chao Xu, Wang Hui, Xie Ying, Meng Qinyu. 2018. Distribution of soil selenium in Guanzhong area and its influencing factors[J]. *Mineral Exploration*, 9(9): 1827–1833 (in Chinese with English abstract).
- Ren Rui, Zhang Zhimin, Wang Hui, Chen Jiping, Qiao Xinxing, Liang Dongli. 2023. Exploring selenium enrichment criteria for soils in the Guanzhong area, Shaanxi Province: A case study of wheat[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 47(5): 1354–1360 (in Chinese with English abstract).
- Sklenicka P. 2016. Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies[J]. *Land Use Policy*, 57: 694–701.
- Sun Kuangling. 2021. Focus on genetic quality strengthen agricultural brand[J]. *Chinese Brands*, 3: 83–85,82 (in Chinese).
- Wang D, Zhou F, Yang W X, Peng Q, Man N, Liang D L. 2017. Selenate redistribution during aging different Chinese soils and the dominant influential factors[J]. *Chemosphere*, 182: 284–292.
- Winkel L H E, Johnson C A, Lenz M, Grundl T, Leupin O X, Amini M, Charlet L. 2012. Environmental selenium research: From microscopic processes to global under–standing[J]. *Environmental Science & Technology*, 46: 571–579.
- Wu Guanhua. 2019. Evaluation of New Cultivated Land Quality in Land Exploitation at Plot Scale: A Case Study of Fuping County[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–99 (in Chinese with English abstract).
- Wu Kening, Zhao Rui. 2019. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 56(1): 227–240 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xuesheng, Luo Jianlan, Huang Fengqiu, Wang Huanhuan, Xia Xueqi, Lu Jiang, Zhang Zihu, Zhu Lifan. 2022. Construction of the evaluation system for Se–rich arable land and its application in Xinxu Town, Xintian County, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(3): 789–801 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yifan, Liu Jianli, Zhang Jiabao. 2014. Evaluation method and model analysis for productivity of cultivated land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(5): 204–210 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinpeng. 2015. The Applied Research of Different Methods in the Natural Productivity Evaluation of Cultivated Land in Jiangxi Province[D]. Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 1–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiangzhou, Li Yizan, Li Ying, Zhang Junling, Zhang Fusuo.

2022. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 59(3): 603–616 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Huafu, Wu Kening. 2021. Discussion of soil survey, land type, and cultivated land evaluation: Based on academic thought of Ni Shaoxiang's land evaluation[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 42(10): 245–252 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qiguo, Yin Xuebin, Sun Min, Liu Yongxian, Hou Feifan, Zhang Ning. 2018. A ten-year overview of functional agriculture from 2008 to 2018[J]. *Soils*, 50(6): 1061–1071 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yeting. 2015. Spatial Characteristics and Changes of Soil Nutrients in Cultivated Land of Guanzhong Region in Shaanxi Province Based on GIS[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 1–190 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Li Baozhi, Lin Tao. 2021. Fostering healthy soil to push forward rural revitalization[J]. *Science and Technology Review*, 39(23): 54–58 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 樊会敏, 许明祥, 李彬彬, 张蓉蓉, 张圣民, 马露洋. 2017. 渭北地区农田土壤物理性质对土壤剖面盐分的影响[J]. *水土保持学报*, 31(4): 198–204.
- 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 2015. 基于层次分析法和 GIS 的秦岭地区魔芋潜在分布研究[J]. *生态学报*, 35(21): 7108–7116.
- 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 2008. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国安全科学学报*, 18(5): 148–153.
- 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. 1992. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社.
- 韩慧杰, 夏学齐, 吴海东, 汤明, 姜明亮. 2019. 基于 GIS 和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价——以安徽省青阳县为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 27(4): 591–600.
- 侯现慧, 王占岐, 杨俊. 2015. 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[J]. *资源科学*, 37(7): 1367–1375.
- 姬华伟, 任蕊, 陈继平, 张继军, 李傲瑞, 冯伟华. 2021. 关中不同类型土壤硒含量特征及其对玉米籽粒硒含量的影响[J]. *西北地质*, 54(4): 239–249.
- 居宇龙, 胡尚军, 陈思, 尹猛, 夏坤, 万翔. 2022. 健康地质调查研究进展及其评价方法[J]. *资源环境与工程*, 36(5): 594–603.
- 李家熙, 黄怀曾, 刘晓瑞. 1999. 环境地球化学在农业和生命科学上的应用研究[J]. *第四纪研究*, 19(3): 224–230.
- 郦逸根, 董岩翔, 郑洁, 李琰, 吴小勇, 朱朝晖. 2005. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. *第四纪研究*, 25(3): 323–330.
- 刘朝亮. 2013. 层次分析法在农业系统中的应用研究[J]. *广东农业科学*, 40(13): 228–232.
- 牛颖超, 周忠发, 王历, 但雨生, 冯倩. 2018. 基于分形插值模型的贵州农产品区土壤养分综合评价研究[J]. *环境化学*, 37(10): 2207–2218.
- 钱凤魁, 王秋兵, 李娜. 2015. 基于耕地质量与立地条件综合评价的高标准基本农田划定[J]. *农业工程学报*, 31(18): 225–232.
- 任蕊, 王明霞, 陈继平, 晁旭, 王晖, 谢颖, 孟秦宇. 2018. 陕西关中地区土壤硒分布特征及影响因素[J]. *矿产勘查*, 9(9): 1827–1833.
- 任蕊, 张志敏, 王晖, 陈继平, 乔新星, 梁东丽. 2023. 陕西关中土壤富硒标准研究与探讨——以小麦为例[J]. *物探与化探*, 47(5): 1354–1360.
- 陕西省临潼县志编纂委员会. 1991. 临潼县志[M]. 上海: 上海人民出版社.
- 孙矿玲. 2021. 聚焦品种品质塑强农业品牌[J]. *中国品牌*, 3: 83–85, 82.
- 吴冠华. 2019. 地块尺度土地开发的新增耕地质量评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–99.
- 吴克宁, 赵瑞. 2019. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 56(1): 227–240.
- 徐雪生, 骆检兰, 黄逢秋, 王欢欢, 夏学齐, 鲁江, 张子虎, 朱丽芬. 2022. 富硒耕地质量评价体系构建及其在湖南省新田县新圩镇的应用[J]. *中国地质*, 49(3): 789–801.
- 闫一凡, 刘建立, 张佳宝. 2014. 耕地地力评价方法及模型分析[J]. *农业工程学报*, 30(5): 204–210.
- 余锦鹏. 2015. 不同方法在江西省省级耕地地力评价中的应用研究[D]. 江西: 江西农业大学, 1–83.
- 张江周, 李奕赞, 李颖, 张俊伶, 张福锁. 2022. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. *土壤学报*, 59(3): 603–616.
- 赵华甫, 吴克宁. 2021. 试论土壤调查、土地类型与耕地评价——兼论倪绍祥先生的土地评价思想[J]. *中国农业资源与区划*, 42(10): 245–252.
- 赵其国, 尹雪斌, 孙敏, 刘永贤, 侯非凡, 张宁. 2018. 2008—2018 年功能农业的理论发展与实践[J]. *土壤*, 50(6): 1061–1071.
- 赵业婷. 2015. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 1–190.
- 朱永官, 李宝值, 吝涛. 2021. 培育健康土壤, 助力乡村振兴[J]. *科技导报*, 39(23): 54–58.