

doi: 10.12029/gc20220308

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.

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).

## 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

徐雪生<sup>1,2</sup>, 骆检兰<sup>1,2</sup>, 黄逢秋<sup>1,2</sup>, 王欢欢<sup>1,2</sup>, 夏学齐<sup>3</sup>, 鲁江<sup>1,2</sup>, 张子虎<sup>4</sup>, 朱丽芬<sup>1,2</sup>

(1. 湖南省地球物理地球化学勘查院, 湖南长沙 410116; 2. 湖南省物探院地球化学动力学实验室, 湖南长沙 410116; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要:**【研究目的】天然富硒农产品是人体摄入硒元素最安全有效的途径, 依托天然富硒土地资源建立的富硒农业和富硒特色小镇等富硒产业, 成为脱贫攻坚和乡村振兴的新兴产业支柱, 其规划和建设需以富硒土地质量等级为基础, 但国内缺乏富硒土地资源评价体系。【研究方法】本文以新田县为例, 从耕地的开发利用条件和潜力、开发利用价值以及开发制约条件着手, 构建耕地地力、经济质量和生态环境“三位一体”的富硒耕地质量评价体系; 基于新田县新圩镇富硒土壤详查数据和全国土地调查成果开展富硒耕地质量评价研究, 对耕地的自然属性、环境属性、经济属性等进行综合评价。【研究结果】其评价结果与农产品质量和富硒程度耦合良好, 真实反映了耕地资源开发条件与潜力。【结论】构建的富硒耕地质量评价体系对富硒耕地资源开发利用有较科学指导价值, 为富硒土地资源和富硒产业规划提供了重要参考和借鉴。

**关键词:** 硒; 耕地质量; 评价体系; 生态环境; 耕地地力; 经济质量; 农业地质调查工程; 新田县; 湖南省

**创新点:** 从耕地的开发利用条件和潜力、开发利用价值和制约条件着手, 构建耕地地力、经济质量和生态环境“三位一体”的富硒耕地质量评价体系, 制定指标权重、调查评价单元、单因子等级和综合等别划定等方法与规则。

中图分类号: F301.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0789-13

## Construction of the evaluation system for Se-rich arable land and its application in Xinxu Town, Xintian County, Hunan Province

XU Xuesheng<sup>1,2</sup>, LUO Jianlan<sup>1,2</sup>, HUANG Fengqiu<sup>1,2</sup>, WANG Huanhuan<sup>1,2</sup>, XIA Xueqi<sup>3</sup>, LU Jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zihu<sup>4</sup>, ZHU Lifan<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Changsha 410116, Hunan, China; 2. Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Laboratory of Geochemical Dynamics, Changsha 410116, Hunan, China; 3. School of

收稿日期: 2021-10-09; 改回日期: 2022-05-12

基金项目: 湖南省矿业权价款项目(20140325)和湖南省国土资源厅科技开发项目(2014-02)联合资助。

作者简介: 徐雪生, 1988年生, 男, 工程师, 主要从事生态与环境地球化学工作; E-mail: wkyxss@126.com。

*Earth Science and Resources, China University of Geosciences( Beijing ), Beijing 100083, China; 4.China State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, CUG, Wuhan 430074, Hubei, China)*

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

**[Objective]** Natural selenium (Se)-enriched agricultural products is the safest and most effective way for human Se uptake. The Se-rich agriculture and Se-rich characteristic towns, which should be established based on natural Se-rich land, have become the pillars of emerging industries for poverty alleviation and rural revitalization. Their planning and construction should be based on the quality evaluation of Se-rich land, but there is a lack of the method for this evaluation. **[Methods]** Taking Xintian County as an example, a new system of Se-rich arable land quality evaluation was established, which was composed of the evaluation of land fertility, economic quality, and ecological environment. The evaluation system was based on the development potential, utilization value, and restriction conditions of the arable land. Additionally, this paper carried out a comprehensive evaluation of the natural, environmental, and economic attributes, based on the results of Comprehensive Survey of Se-enriched Soil Geochemistry and National Land Survey in Xinxu Town of Xintian County. **[Results]** The evaluation results are coincident with the quality of agricultural products and Se-rich degree, which reflected the development conditions and the potential of arable land resources. **[Conclusions]** The above-mentioned evaluation system can guide the development and utilization of Se-rich arable land, and can be used for the planning of Se-rich land resources and related industry.

**Key words:** selenium; arable land quality; evaluation system; ecological environment; land fertility; land economy quality; agricultural geological survey engineering; Xintian County

**Highlights:** Based on the development and utilization conditions and potential, development and utilization value, and restriction conditions, the quality evaluation system of Se-rich arable land was constructed, which was composed of land fertility, economic quality, and ecological environment. The methods and rules of index weight, investigation and evaluation unit, single factor grade, and comprehensive classification were formulated.

**About the first author:** XU Xuesheng, male, born in 1988, engineer, mainly engaged in ecological and environmental geochemistry; E-mail: wkyxxs@126.com.

**Fund support:** Supported by Hunan Mining Rights Price Project (No.20140325), Science and Technology Development Project of Hunan Provincial Department of Land and Resources (No.2014-02).

## 1 引 言

硒(Se)是人体必需的微量元素之一(Thomson et al., 1980; Rayman, 2000),是谷胱甘肽过氧化物酶、前列腺上皮硒蛋白等人体硒蛋白的重要组成成分,适量硒的摄入能预防心血管疾病及癌症,对人体的氧化、衰老及病毒感染等有一定的抵抗能力(李军等, 2011)。据不同国家和地区成年人硒摄入量统计(Yuan et al., 2012),中国绝大部分地区的成人日硒摄入量都显著低于中国居民硒推荐摄入量(RNI)60  $\mu\text{g}/\text{d}$ ,出现显著的硒“隐性饥饿”问题,亟待进行全面补硒。中国居民膳食摄入以谷物为主、蔬菜和肉类为辅(袁丽君等, 2016),经天然富硒农产品等膳食摄入是人体补充硒元素最安全有效的途径,富硒农产品面世以来,广受民众推崇。另一方面,富硒耕地资源和富硒农产品开发、富硒特色

小镇建设等举措(杜红娟, 2016; 中共龙岗镇党委, 2017; 潘庆等, 2020; 李志, 2021),是实现脱贫攻坚、推动乡村振兴的有效途径。因此,硒资源开发和高效利用,可谓利国利民的重大举措。

资源的科学开发和高效利用需建立在科学合理的资源评价体系基础上,但目前富硒土地资源评价存在体系缺失、研究薄弱等问题。评价体系方面,现有土地质量评价体系众多,如国土资源部门的土地质量地球化学评价体系(国土资源部, 2016)和农用地分等定级体系(国土资源部, 2012)、农业部门的耕地地力调查与质量评价体系(农业部, 2008)等,但尚无富硒土地质量评价体系。方法研究方面,王世纪等(2004)根据土壤硒含量对富硒土壤进行了评价;郦逸根等(2005)根据硒相对于成土母质在表层土壤中的富硒程度、硒有效态的含量以及富硒土壤面积对富硒土壤进行了评价;侯现慧等

(2015)根据土壤硒含量、土壤肥力及耕地利用条件对富硒土壤进行了评价;Lian et al.(2017)通过建立包括土壤硒、养分元素和环境质量指标的综合评价模型对富硒土壤进行评价。总的来说,现有对富硒耕地评价的研究多围绕土壤中硒含量及有效态含量来展开,缺乏耕地生产条件、生态环境等指标,或不够系统,或偏于学术,难以指导农业生产布局和富硒产业开发。

湖南省新田县受自然、历史等因素约束,社会经济不佳,自1994年被列为国家“八七”扶贫攻坚县以来,一直是国家重点扶贫对象(唐军,2015)。2010年以来,中国地质调查局陆续在新田县部署开展了1:25万土地质量地球化学调查和1:5万土地质量地球化学评估工作,发现了大面积清洁富硒土壤资源(郑子敬等,2015;骆检兰等,2016;黄逢秋等,2020)。新田县政府利用该成果,逐步建立富硒支柱产业,同时不断深化富硒耕地资源调查和应用研究。2014—2018年,湖南省国土资源厅陆续在新田县新圩镇等地部署开展了富硒土壤地球化学详查与评价、富硒耕地质量提升技术与示范等工作。在中国地质调查局、湖南省国土资源厅和新田县人民政府的多方努力和支持下,至2020年,新田县以富硒产业为支柱实现了“脱贫摘帽”,“新田模式”成为地质调查工作支撑服务脱贫攻坚与乡村振兴等国家战略的典范。因工作程度高、富硒土壤资源优质且集中,新田县新圩镇的2433.33 hm<sup>2</sup>土地于2021年8月获得中国地质学会的首批天然绿色富硒土地土地认证(高梦瑶等,2021),有效促进了当地富硒特色农产品推广。随着新田县富硒产业的不断升级,迫切需要建立涵盖土地开发现状和潜力的富硒耕地质量评价体系,进一步指导富硒产业布局 and 高效开发利用。

综上,在现有富硒土地质量评价体系缺乏、研究薄弱的前提下,应地方政府对富硒土地资源开发规划和产业布局的强烈诉求,基于新田县新圩镇富硒土壤地球化学详查数据和全国土地调查成果开展富硒耕地质量评价研究,从耕地的开发利用条件和潜力、开发利用价值和开发制约条件着手,构建耕地地力、经济质量和生态环境“三位一体”的富硒耕地质量评价体系。为富硒耕地资源的合理规划与开发利用提供科学指导,为富硒土地资源和富硒

产业规划提供了重要参考和借鉴。

## 2 富硒耕地质量评价体系构建

国内学者在土地质量评价指标及评价体系建设方面开展了大量研究,朱永恒等(2005)研究认为:土地质量是指满足人们不同土地需求的状况和条件。包括土壤、气候、生物和景观生态及其所决定的生态环境,生产潜力和承载能力。土地质量指标体系应该包括3个方面:生态质量指标体系、生产质量指标体系和承载质量指标体系,并以区域为单位,分别对未利用地、农用地和建设用地质量评价提出不同的指标体系。张露等(2004)认为土地质量内涵应该包括土地的生态环境质量、土地的经济质量和土地的管理质量。《GB/T 28407—2012 农用地质量分等规程》从农用地自然等、农用地利用等、农用地经济三个方面来评价和划分农用地质量等级,系统全面统计分析农用地土地的自然属性、经济属性及利用属性等影响土地质量的各项因子,此分等体系在宏观上极为健全具体,但在土地自然条件方面未深入至微观元素层面,对于土壤中客观存在的有益元素、有害元素等未作统计分析。《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》从环境地球化学角度对土地的水、土壤、岩石、大气干湿沉降等组成要素进行地球化学评估,主要评估内容为土地各组成的有益元素、有害元素等含量适宜性,深入至微观层面,对土地的自然属性评价较为深入,但对土地的经济属性及管理属性评价程度不够。

参考国内外学者对土地质量评价方面的相关研究,结合富硒土地资源开发的实际需求,建立涵盖耕地地力、经济质量和生态环境“三位一体”的富硒耕地质量评价指标体系,耕地地力既包含耕地基础立地条件、土壤的物理化学性质、土壤养分等耕地自然生产属性,也包括土壤管理的社会属性,表征耕地的基本生产潜力和生产条件;耕地的经济属性亦即土壤和农作物的富硒程度,反映耕地的开发利用价值;生态环境质量主要为土壤和农作物的环境质量,也包含灌溉水环境质量和大气干湿沉降环境质量,是耕地能否开发利用的关键限制性条件。

### 2.1 富硒耕地质量评价指标体系

为尽可能保证富硒耕地质量评价体系既能凸显耕地富硒程度,也包含开发条件、潜力以及关键

限制性条件,同时具较好可对比和可操作性,其评价指标应相对全面,并尽可能与现行国家、地方和团体标准接轨。鉴此,本文参考相关技术标准(农业部,2008;国土资源部,2012,2016)以及国内学者的研究成果(朱永恒等,2005;Liang et al.,2017),结合富硒耕地质量评价目的,选用耕地地力等3个一级指标、立地条件等9个二级指标、地形部位等40个三级指标建立富硒耕地质量评价指标体系(表1)。

表1的一级指标,代表本次对富硒耕地质量评价的3个方面,包括耕地地力、生态环境和经济质量;二级指标是对一级指标的进一步细化分类;三级指标是在二级指标分类的基础上,对应到耕地质量调查数据的具体内容。

开展实际评价时,据评价区范围和耕地质量调查数据状况,在富硒耕地质量评价指标总集中筛选富硒耕地质量评价指标,筛选原则包括:

(1)主导性原则:所选评价指标应是对评价区内耕地质量起主要影响的主导因子,以增强富硒耕

地质量评价的科学性和简洁性。

(2)系统性原则:所选指标因涵盖耕地地力、经济质量和生态环境,即指标总集中一级指标不能缺失。

(3)独立性原则:所选指标相互独立,不能出现因果关系,避免重复评价。

(4)空间变异原则:所选指标必须是在空间上有明显变化,存在着突变阈值的指标,否则将有悖于评价目的。

(5)实用性原则:所选指标为服务对象可接受并能应用于田间条件,数据容易测定,重现性好。

## 2.2 富硒耕地质量等级判定

富硒耕地质量综合等级由耕地地力等别、经济质量等别和生态环境质量等级叠加判定,其中耕地地力等级以特尔斐法结合层次分析法确定权重,计算耕地地力总得分后按判定规则定级;生态环境质量等级和经济质量等别以标准判别法划定。

### 2.2.1 耕地地力等别划定

富硒耕地质量评价指标体系中采用指数参考《GB/T 28407-2012 农用地质量分等规程》,制定耕地地力因子计分表(表2),以特尔斐法结合层次分析法确定因子权重,得出耕地地力综合评分,再按耕地分等定级表(表3)进行分等定级,将耕地地力划为高产能(I等)、中产能(II等)、低产能(III等)三个等别。

### 2.2.2 生态环境质量等级划定

按《NY/T 391 绿色食品 产地环境技术条件》和《NY/T 5010 无公害食品 蔬菜产地环境条件》,确定土壤环境单项指标分级标准,将土壤环境单项指标分为I类(绿色)、II类(无公害)、III类及超III类(不合格)三个类别,再以土壤环境单指标最差等级确定土壤环境综合等级;按GB 5084划定灌溉水单指标环境质量等级,以评价单元内单指标环境质量最差等级定为灌溉水环境质量综合等级;按DZ/T 0295划定大气干湿沉降物单指标环境质量等级,以评价单元内单指标环境质量最差等级定为大气干湿沉降物环境质量综合等级。按表4的生态环境质量等级划定办法确定生态环境质量综合等级。

### 2.2.3 经济质量等别判定

富硒程度的划定应基于证实有效的土壤生物有效性硒为主要指标,但目前国内外学者研究仍未发现生物有效性硒(有效硒)和生物富硒两者间的

表1 富硒耕地质量评价指标总集

Table 1 The variable system used for the Se-rich arable land evaluation

一级指标	二级指标	三级指标
耕地地力	立地条件	地形部位
		地面坡度
		岩石出露
		土层厚度
		成土母质
		剖面构型
土壤物理化学性质	土壤养分	pH
		土壤质地
		土壤类型
		土壤结构
土地管理	土壤颗粒度	有机质、N、P、K
		利用现状
		灌溉保证率
生态环境	土壤环境	Pb、As、Hg、Cd、Cr
	农产品质量	Pb、As、Hg、Cd、Cr
	水环境质量	Pb、As、Hg、Cd、Cr <sup>6+</sup>
	大气环境质量	Pb、As、Hg、Cd、Cr、沉降量
经济质量	富硒程度	土壤Se含量

表2 耕地地力因子分级与计分

Table 2 Classification and scoring of arable land productivity

分值	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
地形部位	平地、沟谷	坡脚					坡腰、山脊	岗顶、山顶		
坡度	<2°	2~5	5~8		8~15			15~25		≥25
土层厚度	≥100	60~100			30~60			<30		
剖面构型	通体壤、壤/砂/壤	壤/黏/壤	壤/黏/粘	砂/黏/砂、壤/砂/砂	砂/黏/粘	粘/砂/黏、通体黏、黏/砂/砂	通体砂、通体砾			
pH	1级	2级	3级		4级			5级		
土壤质地	壤土		黏土	砂土		砾质土				
土壤肥力	1级	2级	3级		4级			5级		
灌溉保证率	充分满足	基本满足	一般满足		无灌溉条件					
排涝能力	1级	2级	3级		4级					
利用现状	水田	旱地								

注:土壤养分元素、有机质含量、环境质量分级均采用水田标准。

有显著相互关系(Goh et al., 2004; Li et al., 2008; El-Ramady et al., 2015; Dinh et al., 2019)。考虑到生物有效性硒多采用单步或多步提取方法(Fordyce et al., 2000; Zhang et al., 2001; Tolu et al., 2011; Qin et al., 2012),实验人员和设备对结果影响较大;另一方面,土壤全硒与有效硒呈显著正相关关系(孙朝等, 2010; 文帮勇等, 2014; 韩笑等, 2021; 王仁琪等, 2021; Liu et al., 2022)。在土壤富硒程度分类时,应以元素总量为主,反映土壤硒元素的潜在供给能力(林才浩, 2004),故参考《DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范》中硒含量等级划分方法,结合王惠艳等(2021)提出的农田富硒土壤阈值,以土壤硒总量制定土壤硒等级划分规则,确定耕地经济质量等级(表5)。

2.2.4 富硒耕地质量综合等级

将耕地地力、经济质量和生态环境三类一级指标等别进行叠加分析,按富硒耕地质量综合等级划分规则(表6)划定富硒耕地质量综合等级。经济质量和生态环境质量作为评价土地质量的主控因子,是富硒耕地质量的主控因素,共同决定富硒耕地质量等级;耕地地力为富硒耕地质量等级调整因子,是评价富硒耕地质量的重要因素,耕地地力指标低,亦即产能较差,评价等级一般在原基础上降一级处理。在点位、单元和图斑属性矢量数据中,除

体现富硒耕地质量综合等级外,还必须保留耕地地力等别、生态环境等级和经济质量等别,以查阅是否可采取相应富硒耕地质量提升措施。

富硒耕地质量综合等级定义与对策为:

1等:绿色无公害富硒中高产耕地。生态环境质量好、耕地地力等级高的富硒耕地,为优先开发利用的绿色无公害优质富硒耕地资源。

2等:绿色无公害中高产耕地。耕地地力等级高,产能强,生态环境质量较好,为优先开发利用的优质绿色无公害农产品产地。

3等:绿色无公害低产耕地。生态环境质量好,但耕地地力等别较差且土壤不富硒,为绿色无公害农产品低产土地。可以耕地地力各因子等级判断存在的耕地地力问题,指导开展土地整治、测土配方施肥等措施,转化为优质绿色无公害农产品产

表4 生态环境质量等级划定

Table 4 Grading of ecological environmental quality

生态环境质量等级	土壤环境质量综合等级	大气沉降环境和灌溉水环境质量综合等级
A	I类	大气沉降和灌溉水环境质量等级不全为二等
B	I类	大气沉降和灌溉水环境质量等级全为二等
	II类	大气沉降和灌溉水环境质量等级不全为二等
C	II类	大气沉降和灌溉水环境质量等级全为二等
	III类及超III类	不限大气沉降和灌溉水环境质量等级

表5 经济质量等别划分规则

Table 5 Grading of soil Se-rich level

等级	项目	3级(缺硒)	2级(足硒)	1级(富硒)
硒	标准值/(mg/kg)	≤0.125	0.125~0.400	≥0.400

表3 耕地地力分等定级

Table 3 Grading of arable land fertility

级别	I等(高产能)	II等(中产能)	III等(低产能)
得分	80~100	50~80	<50

地,并开发利用。

4等:潜在可开发富硒耕地。生态环境质量不佳但富硒耕地,为潜在可开发的富硒耕地资源。潜在经济价值巨大,建议在开发优质耕地的同时,优先开展土壤-农产品精细化调查评价,据评价结果采取耕地安全利用、种植结构调整和富硒耕地质量提升技术等措施,实现富硒耕地资源安全高效利用。

5等:慎重利用耕地。生态环境质量不佳且不富硒耕地,利用价值不高,需进行农产品安全性评估后再开发。

### 2.3 富硒耕地评价单元

服务于富硒耕地资源规划与开发利用的富硒耕地质量评价结果要使地方政府可用、易用,需将点位评价结果赋予耕地图斑,并尽量不分割图斑,实现富硒耕地质量等级与全国国土调查数据的无缝衔接。评价结果由点位到图斑,亦即实现“由点及面”的赋值过程,一般用插值法或赋值法实现。目前的“由点及面”多藉由评价单元实现,尽量保证评价单元内土壤环境趋同(吴冬妹等, 2017; 陈国光等, 2020),笔者认同这一观点。且认为要精准服务于富硒耕地及富硒农产品开发和规划,评价单元还应相对较小;为实现富硒耕地质量评价结果与全国土地调查耕地图斑的无缝衔接,也应尽量不分割土地利用图斑。

南方丘陵山区,耕地图斑较破碎,于县市或乡镇级富硒耕地质量评价而言,多能保证每个评价单元有适量调查点位。因此,单元内可包含多个地类图斑,也可做到不裁剪地类图斑。先以全国土地调查耕地图斑为底图,叠加地质图、区域地球化学图、污染源分布图和地形地貌图,在不分割耕地图斑的基础上,划定调查评价单元,尽量保证单元内

土壤环境趋同。调查时保证每个耕地图斑都有调查点,每个评价单元内至少有3个调查点,最多不超过10个。评价时根据单元内主流同类点位富硒耕地质量综合等级确定评价单元等级,单元内有部分图斑较多点位评价等级与单元内主流点位不一致的,可以图斑为基础进一步细化调整单元。评价单元细化调整和等级确定后,再将评价单元等级赋值至单元内地类图斑。

## 3 富硒耕地质量评价体系在新田县新圩镇的应用

### 3.1 应用区简介

新圩镇位于新田县城南部17 km,下辖19个村,土地总面积3887.96 hm<sup>2</sup>,其中耕地面积1395.33 hm<sup>2</sup>。镇域内丘陵岗地中,地势平缓,土壤发育以红壤为主,耕地集中,是新田县粮食和经济作物主产地。在湖南省自然资源厅和新田县政府支持下,对新圩镇开展了富硒土壤地球化学调查工作。以全国国土调查图斑为底图,叠加地形地貌图、地质图和区域地球化学图(比例尺1:5万)划定调查单元,在调查单元内按约120 m点距布设采集表层土壤样,破碎耕地图斑加密样点,保证每个图斑至少1个表层土壤样点,每个水田图斑至少1个土壤和水稻协同调查点。共采集2204个表层土壤和根际土样品、147个稻米样品、6个灌溉水样品、2个大气干湿沉降样品。土壤样品测试分析N、P、K、有机质、pH、Cd、Hg、As、Pb、Cr、Se、Ca、Mg、B、Mo、硒形态、有效磷、有效钼和有效硼;稻米样品分析Cd、Hg、As、Pb、Cr和Se;灌溉水分析Cd、Hg、As、Pb、Cr<sup>6+</sup>和Se;大气干湿沉降物分析Cd、Hg、As、Pb、Cr。样品采集时记录样品性状、样点周边环境、农业生产活动和基础

表6 富硒耕地质量综合等级划分

Table 6 Comprehensive classification of Se-rich arable land quality

等别	R:G:B	分级				定义
1等	4:168:24	I A1	I B1	II A1	II B1	绿色无公害富硒中高产耕地
		III A1	III B1			
2等	144:243:127	I A2	II A2	I A3	II A3	绿色无公害中高产耕地
		I B2	II B2	I B3	II B3	
3等	225:225:0	III A2	III A3	III B2	III B3	绿色无公害低产耕地
4等	225:153:0	I C1	II C1	III C1		潜在可开发富硒耕地
5等	225:0:0	I C2	I C3	II C2	II C3	谨慎利用耕地
		III C2	III C3			

表7 立地条件和土壤物理化学性质因子相关系数矩阵

Table 7 Correlation coefficient matrix of factors of site condition and soil physico-chemical property

因子	地形部位	地面坡度	土层厚度	岩石出露	土壤类型	土壤结构	土壤质地	成土母质
地形部位	1.000							
地面坡度	-0.033	1.000						
土层厚度	0.271	-0.066	1.000					
岩石出露	0.239	0.038	0.477	1.000				
土壤类型	0.607	-0.015	0.199	0.079	1.000			
土壤结构	0.071	-0.039	-0.017	0.034	0.015	1.000		
土壤质地	0.017	0.108	-0.001	-0.013	0.129	0.043	1.000	
成土母质	0.652	-0.077	0.214	0.183	0.605	0.058	-0.068	1.000

生产条件等信息。

### 3.2 评价指标筛选确定

#### 3.2.1 独立性筛选

对初选的立地条件、物理化学性质及土壤管理各三级指标做相关性分析,避免重复评价,相关系数矩阵见表7。地形部位与土壤类型、成土母质呈显著正相关关系,土层厚度与岩石出露呈正相关关系,土壤类型与成土母质、水源条件呈显著正相关关系,成土母质与水源条件呈显著正相关关系。

由相关系数矩阵结合评价区实际情况,以地形部位代表土壤类型、成土母质,用土层厚度代表岩石出露与土层厚度。

对土壤环境及土壤养分指标各因子进行相关性分析,相关系数矩阵见表8。有机质与N相关系数达0.944,呈极好线性相关关系,故以有机质含量评价土壤N含量;Hg与As相关系数达0.612,线性

相关性较好,但环境指标应从严处理,两者均纳为评价指标。

#### 3.2.2 空间变异性筛选

对生态环境指标进行空间变异性分析,空间变异突变阈值选择土壤或农作物重金属元素含量限值,即以土壤单指标分级Ⅲ类限值和食品中污染物限量(2017)作为突变阈值。对土壤环境及农作物质量进行单指标分类,根据分类结果及单指标分级图剔除出不具空间变异性或空间变异性较弱的元素指标。评价区水质及大气沉降物所有样品重金属元素含量均达标,且评价区范围较小,无明显气候变化,农作物质量合格率达82%以上,超标样本少且呈单点零散分布,无评价意义,故生态环境指标仅选取土壤Cd、Hg、As、Pb作为评价因子。

#### 3.2.3 评价指标及评价规则确定

根据评价指标的主导性、系统性、独立性、生产

表8 土壤养分及土壤环境各因子相关系数矩阵

Table 8 Correlation coefficient matrix of factors of soil nutrients and soil environment

因子	As	Cd	Hg	Pb	N	P	K	Ca	Mg	有机质	Mo	B	Se	pH
As	1													
Cd	0.294	1												
Hg	0.612	0.275	1											
Pb	0.400	0.379	0.364	1										
N	-0.082	0.335	-0.023	0.106	1									
P	0.210	0.394	0.216	0.420	0.434	1								
K	-0.200	-0.160	-0.167	-0.070	0.068	-0.012	1							
Ca	-0.030	0.236	-0.029	0.052	0.219	0.222	-0.352	1						
Mg	-0.246	-0.180	-0.215	-0.079	0.179	0.018	0.570	-0.153	1					
有机质	-0.041	0.320	0.013	0.148	0.944	0.456	-0.045	0.270	0.117	1				
Mo	0.265	0.379	0.165	0.159	-0.138	0.000	-0.072	-0.193	-0.245	-0.165	1			
B	0.067	0.000	0.036	0.201	-0.007	0.049	0.486	-0.478	0.114	-0.052	0.159	1		
Se	0.353	0.518	0.289	0.436	0.169	0.221	-0.132	-0.002	-0.212	0.143	0.470	0.138	1	
pH	-0.081	0.240	-0.052	0.162	0.368	0.313	-0.019	0.496	0.240	0.403	-0.264	-0.119	-0.054	1

性、空间变异性原则,将初选指标进行二次归类筛选,确定的土地质量评价指标见表9。将确定的耕地地力评价指标以问卷形式当面向行业内专家和政府相关管理人员征询意见,用yaahp软件以一致矩阵法(Saaty et al., 2008)进行权重计算和一致性检验,确定耕地地力各类指标权重。生态环境和经济指标按划分标准确定等级。

### 3.3 评价结果与讨论

#### 3.3.1 富硒耕地质量评价结果及其对稻米质量和富硒程度的指示意义

新田县新圩镇的富硒耕地质量综合等级以1等和4等为主,集中连片分布,基础生产条件相对较好;2等地面积相对略小,分布相对成片,基础生产条件较好;5等地面积积极小,多呈小斑块状分布于新田河两岸,基础生产条件好,但农作物超标风险高;镇域范围内无3等地。

以稻米质量是否符合食品中污染物限量标准(国家食品药品监督管理总局, 2017)要求判定是否“污染物超标”,以稻米是否符合富硒稻谷标准(国家质量监督检验检疫总局, 2008)判断是否“富硒”。从调查结果来看,新田县新圩镇稻米富硒程度较高,基本符合农产品质量标准。图1中稻米质量类别饼状图(a)显示稻米富硒比例达59.86%,稻米质量达标比

例高达95.24%。1等和2等耕地中稻米均“富硒且污染物不超标”或“不富硒但污染物不超标”,稻米污染物全低于限量值,富硒比例为46.3%,农产品质量好且富硒程度高,为可优先直接开发富硒农业的耕地资源;4等耕地中稻米以“富硒且污染物不超标”(点位占比64.4%)和“不富硒但污染物不超标”(29.9%)为主,但也有少量样品“富硒但污染物超标”(3.4%)或“不富硒且污染物超标”(2.3%),稻米富硒比例达67.8%,但污染物超标比例也占5.7%,富硒比例高但有污染风险,建议优先评估后采取相应措施开发;5等耕地中稻米既有“富硒且污染物不超标”和“富硒但污染物超标”的,也有“不富硒但污染物不超标”样本,三者占比各为三分之一,开发价值与风险并存,开发条件良莠不齐,需谨慎。稻米与富硒耕地质量综合等级的对应关系,证实富硒耕地质量综合等级对农产品质量的精准指示意义,稻米富硒程度与富硒耕地质量综合等级耦合度极高,对富硒农业和富硒耕地资源开发利用规划有较科学指导价值,其开发利用对策有重要指示意义。

#### 3.3.2 富硒耕地质量评价结果与土地质量评价结果对比

在土地质量评价方面,国内应用较广的当属耕地地力调查与质量评价技术规程(农业部, 2008)、农用地质量分等规程(国土资源部, 2012)和土地质量地球化学评价规范(国土资源部, 2016),本文以最贴近富硒土地质量评价目标的土地质量地球化学评价方法及其结果对比(图2)。

富硒耕地质量评价5等地面积相对较小,其分布与土地质量地球化学评价5等地不一致。特别是新圩镇周围大片土地质量地球化学综合等级为5等的土地,在富硒土地质量综合评价中全为4等,强化了土壤pH、硒含量等指标对土地质量评价的影响;富硒土地质量评价确定的5等地多沿河谷冲积滩分布,重金属超标的农作物样品与5等地较为吻合,说明富硒土地质量5等地与实际生态环境评级基本对应。

富硒耕地质量评价中1等地面积相对较大。土地质量地球化学评价1等和2等土地的区别仅在于土壤养分等级,其土壤养分综合等级评价主要评价土壤中的N、P、K三类元素含量;富硒土地质量评价体系既包含了P、K因子,也包含了土壤性质、有机质等难以短期改变的因子,强化了土壤透气性、保

表9 新田县新圩镇富硒耕地质量评价指标及权重  
Table 9 Evaluation index and weight of Se-rich arable land quality in Xinxu Town, Xintian County

一级指标	二级指标	三级指标
耕地地力	立地条件及土壤性状(0.40)	地形部位(0.15) 坡度(0.13) 土层厚度(0.13) 剖面构型(0.12) 土壤质地(0.12) 土壤结构(0.11) pH(0.24)
		土壤养分(0.40) 有机质(0.50) P(0.20) K(0.30)
	土壤管理(0.20)	利用现状 灌溉保证率 排涝能力
生态环境	土壤环境	Cd Hg As Pb
经济指标	硒含量	土壤Se



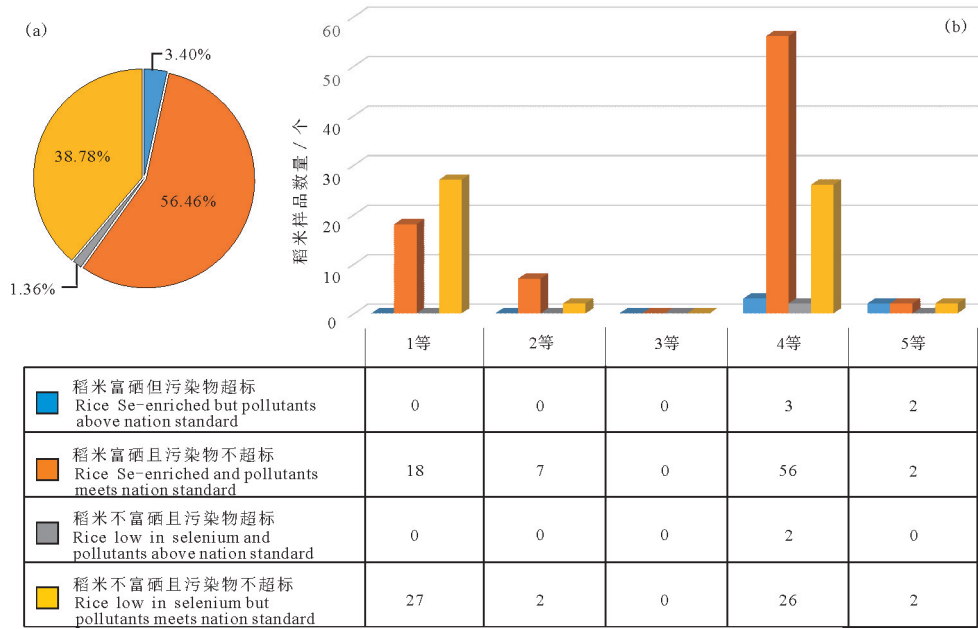


图1 新田县新圩镇富硒耕地质量综合等级及其稻米质量  
a—稻米质量饼状图;b—不同富硒耕地质量综合等级的稻米质量柱状图

Fig.1 Comprehensive grade of Se-rich arable land quality and rice quality in Xinxu Town, Xintian County  
a—Pie chart of rice quality; b—Histogram of rice quality under various Se-rich arable land grade

水保肥能力等方面的指标,而稍微弱化了土壤中N、P、K总量对土壤肥力的影响。最重要的是以硒含量作为主导因子,硒含量越高,土壤肥力等级对土地质量综合评级的影响就越小。富硒耕地质量评价体系与土地质量地球化学评价体系富硒划分阈值一致,两者在硒等级划分方面无显著差异。富硒耕地质量评价体系相比土地质量评价体系的的优势在于纳入了耕地地力(生产力)指标,并整合富硒程度指标,形成“一张图”,更易用,且能更好指导富硒农业及相关产业开发与规划。

### 3.3.3 富硒耕地质量评价体系与其他富硒土壤评价方法的比较

国内富硒土地资源评价工作一般是在富硒土壤(土壤硒、环境质量、养分丰缺等级划分)基础上,叠加水、大气环境和农作物评价成果,并将中大比例尺的评价成果落到土地利用图斑,多为某类指标分别评价后再部分分析后,提出富硒土地资源利用规划(刘子宁等, 2017;王刚等, 2018;曾庆良等, 2018;郑先迪等, 2018;汤奇峰等, 2020;周国华等, 2020;周殷竹等, 2020;乔新星等, 2021),对土地的生产条件、土壤管理条件等因素不加考虑,评价不够系统,成果表达不够直观。Liang et al.(2017)通

过计算综合评价指数,建立包括土壤硒、养分元素和环境质量指标的综合评价模型,再利用地理信息系统展示评价结果的空间分布特征,成果表达较好,但也还存在评价体系不够完善的问题。蔡海生等(2020)选取土壤硒含量、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类关键指标,构建富硒土壤资源开发利用生态位适宜性评价指标体系,但该评价体系尚不能精准指导富硒耕地资源的开发利用。

本文的富硒耕地质量评价中硒元素含量等级与生态环境占主导地位,又综合考虑了土壤性质、土壤管理等各方面因素。对耕地的基本生产条件、耕地地力、土壤环境、富硒程度等进行了较全面评价,体系更为全面、更有针对性。从评价结果来看,划定的富硒耕地质量综合等级与农产品质量及富硒程度极为吻合,具备极好的生产指导价值,益于地方政府及企业直接应用评价成果,指导富硒农业产业规划与资源开发利用。

## 4 结论

(1)本文从耕地开发利用的条件和潜力、开发利用价值以及开发制约条件着手,构建了耕地地

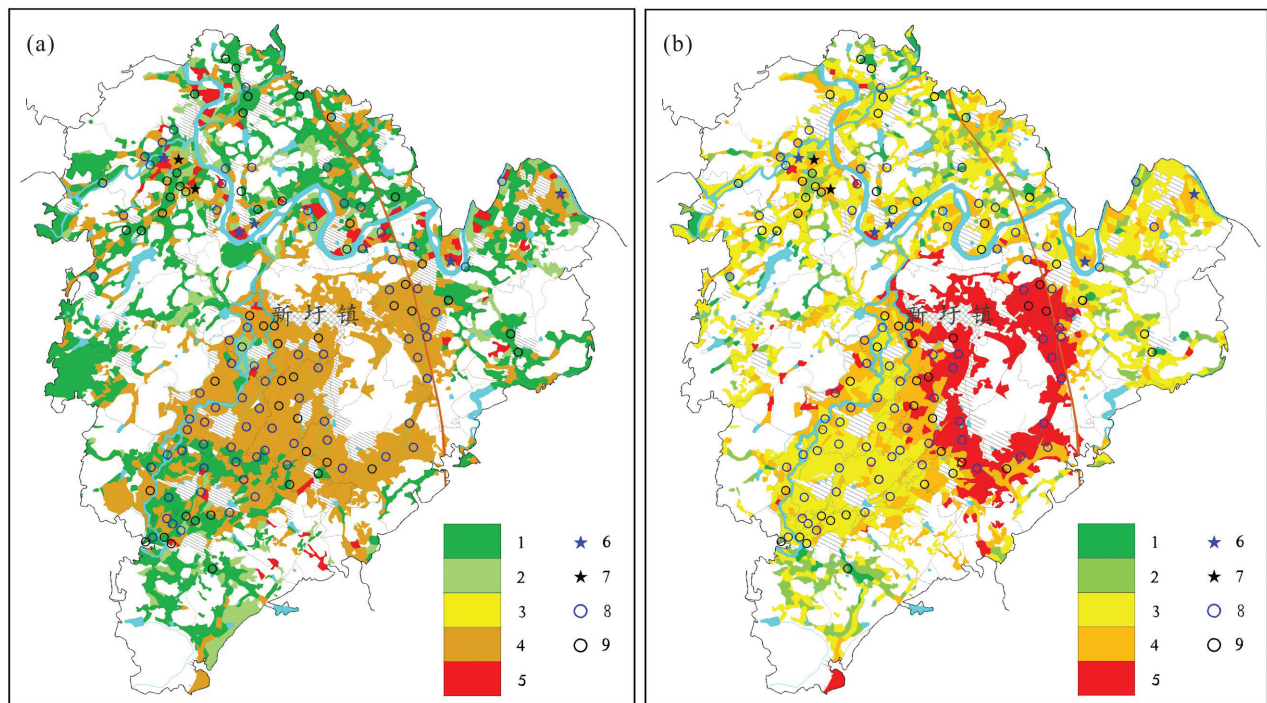


图2 新田县新圩镇富硒耕地质量综合等级图(a)和土地质量地球化学综合分类图(b)及稻米质量  
1—1等;2—2等;3—3等;4—4等;5—5等;6—稻米富硒但污染物超标;7—稻米不富硒且污染物超标;8—稻米富硒且污染物不超标;9—稻米不富硒但污染物不超标

Fig. 2 The distribution of comprehensive grade of Se-rich arable land (a) and land quality geochemical comprehensive grade (b) with rice quality in Xinxu Town, Xintian County

1—Grade 1; 2—Grade 2; 3—Grade 3; 4—Grade 4; 5—Grade 5; 6—Se-enriched rice with pollutants above nation standard; 7—Low Se rice with pollutants above nation standard; 8—Se-enriched rice with pollutants under nation standard; 9—Low Se rice with pollutants under nation standard

力、经济质量和生态环境“三位一体”的富硒耕地质量评价指标体系,同时提出了指标权重、单因子等级划定、调查评价单元划定和综合等级划定等方法和规则,构建的富硒耕地质量评价体系较为全面、完善。评价指标既包括土壤环境质量、土壤养分、土壤硒含量必需指标,也包括土壤基础物理化学性质、土壤管理等开发利用条件指标,同时能更好与全国国土调查数据衔接,既符合地方政府规划开发富硒土地资源的实际需求,也提高了评价成果的易用性。

(2)构建的富硒耕地质量评价体系单因子评价方法多参考现行行业标准或较成熟技术,基本符合国家相关标准和要求,既体现相关技术规程评价成果的独立性,也实现了相互融合和优势互补。在新田县新圩镇的应用成效也验证了富硒耕地质量评价体系的科学适用性,对富硒土地资源规划利用以及富硒产业规划和调整有重大指导价值。

(3)评价体系的1等地和2等地为可直接作为

优质富硒耕地资源和绿色无公害耕地资源开发;4等地有较大开发价值,但有一定污染风险,需进一步评估农产品的安全性,并据耕地地力等级确定是否改良基础生产条件;3等地开发潜力较好,但需采取土地整治、地力提升等措施,弥补基础生产力的不足;5等地有一定开发价值,但伴随较大风险,也可能存在一定开发难度,需谨慎评估与开发。

(4)本文构建的富硒耕地质量评价体系在南方耕地图斑较破碎地区预期适用性较好,在新田县新圩镇的应用结果也印证如此。但在北方等平原区,耕地图斑较大,存在必须分割耕地图斑的可能性,尚待进一步验证研究。

**致谢:**编辑和审稿专家提出了宝贵修改意见和建议,谨此致谢!

## References

Agricultural Ministry of the PRC. 2008. NY/T 1634-2008, Rules for

- Soil Quality Survey and Assessment [S]. Beijing: China Commerce and Trade Press.
- Cai Haisheng, Chen Yi, Zhang Xueling. 2020. Suitability evaluation and zoning method research on development and utilization of selenium-rich soil resources based on niche theory [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(24): 9208–9219 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guoguang, Liang Xiaohong, Zhang Jie, Yang Zhongfang. 2020. Geochemical survey method of land quality in hilly areas: A case study of the geochemical survey of land quality in Ganzhou [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(3): 463–469 (in Chinese with English abstract).
- CPC Longgang Town Party Committee, People's Government of Longgang Town. 2017. Ecological Longgang selenium-rich town theory and contemporary [J]. *Theory and Contemporary*, 2017(11): 31–32 (in Chinese).
- Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, Zhou F, Wang D, Zhai H, Peng Q, Xue M Y, Du Z K, Banuelos G S, Lin Z Q, Liang D L. 2019. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(6): 443–517.
- Du Hongjuan. 2016. Our Journal Organizes Experts to go to Puo Luo Community make contribution to build “selenium-rich characteristic town” [J]. *Agricultural Products Market*, 2016(17): 38–41 (in Chinese).
- El-Ramady H, Abdalla N, Alshaal T, Domokos-Szabolcsy E, Elhawati N, Prokisch J, Sztrik A, Fari M, El-Marsafawy S, Shams M S. 2015. Selenium in soils under climate change, implication for human health [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 13(1): 1–19.
- Fordyce F M, Zhang G D, Green K, Liu X. 2000. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China [J]. *Applied Geochemistry*, 15(1): 117–132.
- Gao Mengyao, Zhang Lihua. 2021. The first batch of natural selenium-riched land identified by Geological Society of China [J]. *Geological Review*, 67(5): 1296, 1356 (in Chinese with English abstract).
- Goh K H, Lim T T. 2004. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption [J]. *Chemosphere*, 55(6): 849–859.
- Han Xiao, Zhou Yue, Wu Wenliang, Meng Fanqiao. 2018. Selenium contents of farmland soils and their relationship with main soil properties in Fengcheng, Jiangxi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(6): 1177–1183 (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).
- Huang Fengqiu, Liu Xianli. 2020. Geochemical characteristics of soil quality in Yongzhou City, Hunan Province [J]. *Popular Standardization*, (17): 26–27 (in Chinese).
- Li H F, Mc Grath S P, Zhao F J. 2008. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. *New Phytologist*, 178(1): 92–102.
- Li Jun, Zhang Zhicheng. 2011. Trace element selenium and human health [J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 28(5): 59–63 (in Chinese).
- Li Yigen, 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 Zhi. 2021. Master agriculture: Anchoring selenium-rich products to help rural revitalization [N]. *China Enterprise News*, 2021-07-20 (7) (in Chinese).
- Liang Ruoyu, Song Shuai, Shi Yajing, Shi Yajuan, Lu Yonglong, Zeng Xiaoqi, Xu Xiaobo, Wang Yurong, Han Xuesong. 2017. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soils based on the analytic hierarchy process: Assessment system construction and case demonstration [J]. *Science of the Total Environment*, 605/606: 618–625.
- Lin Caihao. 2004. Geochemical classification of soils in the downstream area of the Jiulong River, Fujian Province [J]. *Geology in China*, 31(3): 332–336 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zining, Li Tingting, Luo Siliang. 2017. Resource evaluation of selenium-rich soils in Taishan region of the Pearl River Delta [J]. *Journal of Geology*, 41(4): 672–677 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiujin, Yang Ke, Guo Fei, Tang Shiqi, Liu Yinghan, Zhang Li, Cheng Hangxin, Liu Fei. 2022. Effects and mechanism of igneous rock on selenium in the tropical soil-rice system in Hainan Province, South China [J]. *China Geology*, 5(1): 1–11.
- Ministry of Land and Resources of the PRC. 2016. DZ/T 0295–2016, Specification of Land Quality Geochemical Assessment [S]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Ministry of Land and Resources of the PRC. 2012. GB/T 28407–2012, Regulation for Gradation on Agricultural Land Quality [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- National Health and Family Planning Commission of the PRC, China Food and Drug Administration. 2017. GB 2762–2017, National Food Safety Standards – Limits of pollutants in food [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- Pan Qing, Qian Wei. 2020. Research on the development of characteristic towns based on the construction of industrial ecosystem: Take Shitai County as an example [J]. *Journal of Jilin Engineering Normal University*, 36(12): 42–44 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xinxing, Chao Xu, Ren Rui, Zhang Jijun, Hu Kui, Li Aorui, Zhang Zhimin. 2021. Research, development and utilization of selenium-rich soil of Shaanxi: A case study of Sanyuan-Yanliang

- area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(1): 230–238 (in Chinese with English abstract).
- Qin H B, Zhu J M, Su H. 2012. Selenium fractions in organic matter from Se-rich soils and weathered stone coal in selenosis areas of China [J]. *Chemosphere*, 86(6): 626–633.
- Rayman M P. 2000. The importance of selenium to human health [J]. *The Lancet*, 356: 33–241.
- Saaty T L, Sodenkamp M. 2008. Making decisions in hierarchic and network systems [J]. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 1(1): 24–79(56).
- State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. 2008. GB/T 22499–2008, China Selenium Paddy [S]. Beijing: The Commercial Press (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhao, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yang Xiaoyan, Huang Yong, Chen Enke. 2010. Factors controlling the transport and transformation of selenium in typical soil environments: A case study of the Chengdu economic zone in Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 37(6): 1760–1768 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jun. 2015. Grasping the opportunities of targeted poverty alleviation and promoting the construction of a well-off society in an all-round way [N]. *Yongzhou Daily*, 2015–10–19(004) (in Chinese).
- Tang Q F, Xu C L, Liu S W, Wei J X, Zhang M, Zhang X, Liu J C. 2020. Characteristics and protection and utilization of natural selenium-rich land resources in Ruijin Basin, Ganzhou, Jiangxi Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 1932–1943 (in Chinese with English abstract).
- Thomson C D, Robinson M F. 1980. Selenium in human health and disease with emphasis on those aspects peculiar to New Zealand [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 33(2): 303–23.
- Tolu J, Le Hécho I, Bueno M. 2011. Selenium speciation analysis at trace level in soils [J]. *Analytica Chimica Acta*, 684(1/2): 126–133.
- Wang Gang, Tu Qijun, Ma Hongchao, Fan Leishan. 2018. The investigation and evaluation of selenium-rich land resources in Wensu County of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 36(4): 448–454 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huiyan, Zeng Daoming, Guo Zhijuan, Cheng Xiaomeng, Peng Min, Sun Yue. 2021. Selenium threshold for the delimitation of natural selenium-enriched [J]. *Land Environmental Science*, 42(1): 333–342 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiji, Wu Xiaoyong, Liu Junbao. 2004. Characteristics of elemental selenium in soils and evaluation of eco-environmental effects in northern Zhejiang [J]. *Geology in China*, 31(S1): 118–125 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renqi, Zhang Zhimin, Chao Xu, Feng Haiyan, Yang Zhongfang. 2020. A study of the selenium speciation in paddy soil and status of selenium-enriched rice in western part of Ankang, Shaanxi Province [J/OL]. *Geology in China*, 1–18[2021–11–08] (in Chinese with English abstract).
- Wen Bangyong, Zhang Taoliang, Li Xizhou, Xie Zhengdong. 2014. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province [J]. *Geology in China*, 41(1): 256–263 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dongmei. 2017. Division of evaluation units in land quality geochemical assessment—A case study of Xiaoguan Town, Xuan'en County [J]. *Resources Environment & Engineering*, 31(5): 558–562 (in Chinese with English abstract).
- Yuan L, Yin X, Zhu Y, Fei L, Hang H, Ying L, Lin Z. 2012. Selenium in Plants and Soils, and Selenosis in Enshi, China: Implications for Selenium Biofortification [M]. Springer Netherlands.
- Yuan Lijun, Yuan Linxi, Yin Xuebin, Qin Liqiang. 2016. Physiological function, deficiency and its solutions on selenium: A review [J]. *Current Biotechnology*, 6(6): 396–405 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingliang, Yu Tao, Wang Rui. 2018. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei [J]. *Geoscience*, 32(1): 105–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Zhao F J, Sun B, William D, Steve P M. 2001. A new method to measure effective soil solution concentration predicts copper availability to plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 35(12): 2602–2607.
- Zhang Lu, Pu Lijie, Zhou Feng. 2004. Preliminary study on concept and measurement of land quality[J]. *Journal of Nanjing University Natural Sciences*, (3): 378–388 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiandi, Liu Youzhao. 2018. Exploitation and utilization of selenium rich land resources in Lishui District of Nanjing City based on GIS [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(4): 282–287 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zijing, Xun ZhiJian, Zhu Xianyun. 2015. Developing special industry based on abundant selenium resource in poverty-stricken areas—Taking Xintian County of Hunan Province as an example [J]. *Natural Resource Economics of China*, 28(12): 19–22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua. 2020. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 39(3): 319–336 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yin Zhu, Wang Biao, Liu Yi, Wang Siyuan, Zhou Jinlong. 2020. Geochemical evaluation of soil quality and land-use regionalization of selenium-rich soils in cultivated area around Nangqian County, Qinghai [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(10): 93–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongheng, Pu Lijie, Zhao Chunyu. 2005. Conception of land quality and its evaluation indicators [J]. *Territory & Natural Resources Study*, (2): 31–33 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 蔡海生, 陈艺, 张学玲. 2020. 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[J]. 生态学报, 40(24): 9208-9219.
- 陈国光, 梁晓红, 张洁, 杨忠芳. 2020. 丘陵区土地质量地球化学调查方法技术——以服务赣州六县精准脱贫土地质量地球化学调查为例[J]. 物探与化探, 44(3): 463-469.
- 杜红娟. 2016. 本刊组织专家赴“椴榔树”助力打造“富硒特色小镇”[J]. 农产品市场周刊, 2016(17): 38-41.
- 高梦瑶, 张丽华. 2021. 中国地质学会认定首批天然富硒土地[J]. 地质论评, 67(5): 1296, 1356.
- 韩笑, 周越, 吴文良, 孟凡乔. 2018. 富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系——以江西丰城为例[J]. 农业环境科学学报, 37(6): 1177-1183.
- 侯现慧, 王占歧, 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.
- 黄逢秋, 刘显丽. 2020. 湖南省永州市土壤质量地球化学特征[J]. 大众标准化, (17): 26-27.
- 李军, 张忠诚. 2011. 微量元素硒与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 28(5): 59-63.
- 李志. 2021. 硒品农业: 铆定富硒产品助力乡村振兴[N]. 中国企业报, 2021-07-20(007).
- 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.
- 林才浩. 2004. 福建九龙江下游地区土壤地球化学分类[J]. 中国地质, 31(3): 332-336.
- 刘子宁, 李婷婷, 罗思亮. 2017. 珠江三角洲台山区富硒土壤资源评价[J]. 地质学刊, 41(4): 672-677.
- 骆检兰, 苏正伟, 黄逢秋, 张建新, 刘耀荣, 吴金华, 刘显丽, 朱丽芬, 王欢欢, 邢亚伦. 2016. 湖南新田县土地质量地球化学评估及应用[J]. 中国科技成果, (14): 52-53, 60.
- 潘庆, 钱伟. 2020. 基于产业生态圈构建的特色小镇发展研究——以石台县富硒氧吧小镇为例[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 36(12): 42-44.
- 乔新星, 晁旭, 任蕊, 张继军, 胡奎, 李傲瑞, 张志敏. 2021. 陕西关中富硒土壤研究及开发利用——以三原—阎良地区为例[J]. 物探与化探, 45(1): 230-238.
- 孙朝, 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 黄勇, 陈恩科. 2010. 典型土壤环境中硒的迁移转化影响因素研究——以四川省成都经济区为例[J]. 中国地质, 37(6): 1760-1768.
- 汤奇峰, 徐春丽, 刘斯文, 魏吉鑫, 张明, 张旭, 刘久臣. 2020. 江西赣州市瑞金盆地天然富硒土地资源特征与保护利用[J]. 地质通报, 39(12): 1932-1943.
- 唐军. 2015. 抢抓精准扶贫机遇 推进全面小康社会建设[N]. 永州日报, 2015-10-19(004).
- 王刚, 涂其军, 马宏超, 范磊善. 2018. 新疆温宿县富硒土地资源调查与评价[J]. 新疆地质, 36(4): 448-454.
- 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃. 2021. 天然富硒土地划定的富硒阈值[J]. 环境科学, 42(1): 333-342.
- 王仁琪, 张志敏, 晁旭, 冯海艳, 杨忠芳. 2021. 陕西省安康市西部稻田土壤硒形态特征与水稻富硒状况研究[J/OL]. 中国地质: 1-18[2021-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201019.1838.020.html>.
- 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 2004. 浙北地区土壤硒元素特征及生态环境效应评价[J]. 中国地质, 31(S1): 118-125.
- 文帮勇, 张涛亮, 李西周, 谢振东. 2014. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. 中国地质, 41(1): 256-263.
- 吴冬妹. 2017. 土地质量地球化学评价中评价单元的划分——以宣恩县晓关乡为例[J]. 资源环境与工程, 31(5): 558-562.
- 袁丽君, 袁林喜, 尹雪斌, 秦立强. 2016. 硒的生理功能、摄入现状与对策研究进展[J]. 生物技术进展, 6(6): 396-405.
- 张露, 濮励杰, 周峰. 2004. 土地质量及其度量初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), (3): 378-388.
- 曾庆良, 余涛, 王锐. 2018. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质, 32(1): 105-112.
- 郑先迪, 刘友兆. 2018. 基于GIS的南京市溧水区富硒土地资源开发利用研究[J]. 水土保持通报, 38(4): 282-287.
- 郑子敬, 苟志坚, 朱先云. 2015. 贫困地区利用富硒资源发展特色产业的路径选择——湖南省新田县为例[J]. 中国国土资源经济, 28(12): 19-22.
- 中共龙岗镇党委, 龙岗镇人民政府. 2017. 生态龙岗富硒小镇[J]. 理论与当代, (11): 31-32.
- 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 2017. GB 2762-2017, 食品安全国家标准——食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 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. 2008. GB/T 22499-2008, 富硒稻谷[S]. 北京: 商务印书馆.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中国地质出版社.
- 中华人民共和国国土资源部. 2012. GB/T 28407-2012, 农用地质量分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国农业部. 2008. NY/T 1634-2008, 耕地地力调查与质量评价技术规程[S]. 北京: 中国商务出版社.
- 周国华. 2020. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 39(3): 319-336.
- 周殷竹, 王彪, 刘义, 王思源, 周金龙. 2020. 青海囊谦县城周边农耕地土壤质量地球化学评价及富硒土地利用分区[J]. 干旱区资源与环境, 34(10): 93-101.
- 朱永恒, 濮励杰, 赵春雨. 2005. 土地质量的概念及其评价指标体系研究[J]. 国土与自然资源研究, (2): 31-33.