

doi: 10.11720/wtyht.2021.0046

刘道荣,焦森.天然富硒土壤成因分类研究及开发适宜性评价[J].物探与化探,2021,45(5):1157-1163. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0046>

Liu D R, Jiao S. Assessment of genetic classification and development suitability of natural selenium-rich soil[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1157-1163. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0046>

天然富硒土壤成因分类研究及开发适宜性评价

刘道荣¹, 焦森²

(1. 中化地质矿山总局 浙江地质勘查院, 浙江 杭州 310002; 2. 中化地质矿山总局, 北京 100013)

摘要:天然富硒土壤的形成常受控于成土母质,空间上与黑色岩系、含煤岩系、炭质泥(页)岩、泥质灰岩、火山岩等富硒岩石分布区密切相关。不同成因类型的富硒土壤开发适宜性差异较大,但目前尚无天然富硒土壤系统的成因分类方案。本文通过整理我国主要天然富硒土壤成因,按土壤硒来源的主要控制因素——成土母质,在现有分类方案基础上,将天然富硒土壤成因归纳为 3 个大类、10 个亚类。对黑色岩系型、含煤岩系型、火山岩型、浅变质岩型等 4 种重要亚类的富硒土壤主要特征及开发适宜性进行概略评述,并据此提出天然富硒土壤开发适宜性评价指标。

关键词:天然富硒土壤;成土母质;成因分类;开发适宜性

中图分类号: X142, P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)05-1157-07

0 引言

硒是动物和人体生理必需的微量营养元素,是人体谷胱甘肽过氧化物酶的组成部分,能调节维生素 A、C、E、K 的吸收,具有阻断基因突变,抗氧化,提高免疫力,拮抗砷、镉、汞等重金属毒性的作用^[1-3]。人体缺硒易导致心血管病、糖尿病等,严重时易引发大骨节病、克山病^[4]。缺硒地区人群通过适度补硒,尤其是食用天然富硒农产品,能达到预防疾病的效果。天然富硒土壤是指土壤中硒元素(或有效态硒)含量达到某一特定范围值,具备生产富硒农产品产地条件,并能生产天然富硒农产品的土壤^[5-6]。因此,富硒土壤是开发出天然富硒农产品的先决条件,是稀缺的土壤资源,具有重要的农业经济价值。

土壤硒来源、富硒土壤成因是决定土壤硒生物有效性及富硒土地资源可利用性的根本原因^[1]。不同成因类型的富硒土壤生产出的农产品富硒程度不同^[7]。因此,划分富硒土壤的成因类型,对分类

指导富硒土壤开发具有重要意义,但相关研究程度还比较低。不同研究者虽然从天然富硒土壤成因或主要控制因素出发,对分类进行了探索^[7-9],但这些分类方案或适用范围较小,或分类标准不一,一定程度上影响和制约了富硒土壤的评价与开发。笔者总结了我国主要天然富硒区富硒土壤成因与富硒土壤分类研究进展,提出基于母岩——成土母质的天然富硒土壤成因类型划分方案,并对黑色岩系型、含煤岩系型、火山岩型、浅变质岩型等 4 种重要亚类的富硒土壤特征及开发适宜性进行概略评述,提出天然富硒土壤开发适宜性评价指标,以期为富硒土壤资源科学利用提供依据。

1 天然富硒土壤成因认识与分类研究现状

1.1 天然富硒土壤成因认识

岩石是决定多数地区土壤硒含量的关键因素^[1]。天然富硒土壤主要分布于富硒岩石、煤系地层分布区及硒矿化、金属硫化物矿化区^[4,10-12]。浙西富硒土壤多与寒武系黑色岩系密切相关^[13-14];浙

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-03-26

基金项目: 中化地质矿山总局化工地质勘查专项资金项目(201905)

第一作者: 刘道荣(1982-),男,正高级工程师,工程硕士,主要从事矿产地质、农业地质调查研究工作。Email: liudaorong0@163.com

北嘉善富硒土壤的形成与湖沼相沉积有关^[15]。陕西紫阳富硒土壤与寒武—奥陶—志留系(除梅子埡组)的黑色含炭岩系分布一致^[16]。湖北恩施富硒土壤与二叠系煤系地层及黑色岩系有关^[4,17]。贵州富硒土壤多与二叠系煤层、寒武系黑色岩系以及磷块岩分布有关^[18-19]。安徽省富硒土壤与震旦—二叠系地层、侏罗系火山岩、燕山期侵入岩等高硒岩石分布区空间分布一致,其中寒武系石煤、硅质岩、灰岩、石炭系炭质页岩、钙质页岩,二叠系灰岩等岩石硒含量较高($w(\text{Se}) > 0.12 \times 10^{-6}$)^[8]。福建寿宁富硒土壤与侏罗系火山碎屑岩类有关^[20]。海南富硒土壤主要与变质岩(变质粉细砂岩、板岩等)有关^[21]。广西全州富硒土壤与二叠系黑色炭质岩系的高硒背景有密切关系^[22];南宁市富硒土壤主要由二叠系碳酸盐岩和寒武系碎屑岩等高硒岩层引起^[23]。江西龙南县富硒土壤查证结果表明,富含硒的基岩(煤、炭质岩类等岩石)是富硒土壤分布的控制因素^[24];赣南典型地区富硒土壤主要与煤系地层和石炭系页岩、粉砂岩、灰岩等广泛分布有关^[25]。上述典型地区天然富硒土壤分布都受控于地质背景,黑色岩系、煤系地层、炭质泥(页)岩、火山碎屑岩、部分变质岩、碳酸盐岩等富硒岩石风化后,易形成富硒土壤。

成土母质是岩石经过风化作用后,就地残积或搬运后在地壳表层形成的疏松堆积物,是形成土壤的物质基础。成分不同的成土母质,发育形成的土壤中元素含量差异较显著。土壤硒常具有明显的继承性,其含量高低更大程度上取决于成土母质硒含量^[13,22,26-27]。如花岗岩硒含量低,其形成的母质和土壤硒含量都较低^[14,25];而炭硅质岩类风化物、含煤岩系风化物常形成富硒土壤^[13,24]。由于成土母质对土壤硒来源具有较好的指示意义,因此可根据成土母质类型来进行天然富硒土壤成因分类。值得注意的是,运积母质通常是多种岩石风化的产物,因此,残积母质较运积母质能更好地反映母岩的成分。在天然富硒土壤成因、土壤硒来源判断上,要注意二者差异。

1.2 天然富硒土壤成因分类研究现状

目前尚无天然富硒土壤系统的成因分类方案。大多数研究者都从土壤硒的来源或富硒土壤主控因素出发,进行分类研究。

王锐等^[9]按富硒土壤主要控制因素,将我国主要农耕区土壤硒成因类型分为4种:①受煤系、黑色地层影响及控制,②受沉积作用影响,③受土壤有机

质影响及控制,④受基性火山岩影响;并对每个成因类型典型区土壤硒元素含量分布特征及来源等进行了概述。但其分类标准不统一,且对土壤硒的生物有效性、农产品富硒特点及开发利用前景等未进行评述,难以区分不同类型富硒土壤的可利用性。

贾十军^[8]根据地质背景差异,将安徽省自然成因富硒土壤分为两类,分别为高硒岩石风化形成和特殊沉积环境形成,同时指出特殊沉积环境形成的富硒土壤其沉积物母质的源区或水系上游,一般存在高硒地层。实际上这二类富硒土壤的成因相近,只是前者为残积母质,后者为运积母质,该方案难以区别不同高硒地层形成的富硒土壤差异。

宋明义^[13]通过对比各类富硒土壤差异,按不同成土母质,将浙江省天然富硒土壤成因类型归纳为4种,即火山岩型、石煤型、燃煤型、湖沼型,并详细对比了各类型富硒土壤的基本特征、土壤重金属及有效硒含量、农产品硒含量、富硒土壤可开发利用程度,认为石煤型富硒土壤的可利用性最高,其次为燃煤型和湖沼型,火山岩型最低。并提出针对不同类型富硒土壤的开发利用建议,对浙江省富硒土壤开发利用具有较好指导作用。但从全国范围来看,富硒土壤母质类型众多,仅按火山岩型、石煤型、燃煤型、湖沼型无法完全归纳,如变质岩类风化物、碳酸盐岩类风化物、泥页岩类风化物等形成的富硒土壤都不属于上述分类范围,因此该分类方案还有待进一步完善。

2 基于母岩—母质的天然富硒土壤成因分类

2.1 分类方案

如前所述,富硒土壤受控于地质背景,土壤硒主要来自成土母质(母岩),若按土壤母岩成因先分大类,再根据母质差异细分亚类,则富硒土壤成因的类别较容易确定。

根据土壤母岩的成因,按岩石学分类方案,可将天然富硒土壤分为沉积岩型、岩浆岩型、变质岩型3个类别(表1)。沉积岩型天然富硒土壤按成土母质类型可分为表生沉积型、黑色岩系型、含煤岩系型、碳酸盐岩型、碎屑岩型等5个亚类;岩浆岩型天然富硒土壤可分为侵入岩型、火山岩型及次火山岩型3个亚类;变质岩型天然富硒土壤可分为浅变质岩型、中深变质岩型2个亚类。

表 1 天然富硒土壤成因分类

Table 1 Genetic classification of natural selenium-rich soils

类	亚类	主要成土母质类型	代表性地区	参考文献
沉积岩型	表生沉积型	全新世洪冲积物	浙江常山	[14]
		湖沼相沉积物	浙江嘉善	[15]
		湖相沉积物	浙江宁波	[28]
		早中更新世红土风化物	浙江金华	[26]
	黑色岩系型	炭硅质岩类风化物	浙西地区,陕西紫阳,安徽石台, 湖北恩施,贵州开阳	[13],[16],[29], [17],[19]
	含煤岩系型	含煤岩系风化物	湖北恩施	[17 - 18]
	碳酸盐岩型	白云岩类风化物	滇中易门,贵州开阳	[30],[19]
		泥质灰岩类风化物	浙北	[10]
		灰岩类风化物	安徽	[8]
	碎屑岩型	泥页岩类风化物	赣南、青海东部	[25],[31]
		砂泥岩类风化物	广西北部湾、江西丰城	[27],[32]
		石灰性紫色泥岩类风化物	浙北	[10]
岩浆岩型	侵入岩型	酸性侵入岩类风化物	福建寿宁、海南	[20 - 21]
		中性侵入岩类风化物	广东台山	[33]
		基性—超基性侵入岩类风化物	广东台山	[33]
	火山岩型	酸性火山岩类风化物	福建寿宁、浙东沿海	[20],[34]
		中酸性火山岩类风化物	福建寿宁、浙东沿海	[20],[34]
		玄武岩类风化物	海南	[21]
	次火山岩型	酸性—中酸性次火山岩类风化物		
		基性—超基性次火山岩类风化物		
变质岩型	浅变质岩型	千枚岩类风化物		
		蚀变凝灰岩类风化物	浙江常山	[14]
		变质砂(泥)岩类风化物	海南	[21]
	中深变质岩型	板岩类风化物	滇中易门	[30]
		片岩类风化物	海南	[21]
		角闪岩类风化物	浙江龙游	[35]
		黑云斜长片麻岩类风化物	浙江龙游	[35]

注:成土母质的划分方案主要参考文献[34]。

2.2 分类方案对比

宋明义等^[7]提出的火山岩型、石煤型、燃煤型、湖沼型,分别相当于表 1 中岩浆岩型大类中的火山岩型亚类,沉积岩型大类中的黑色岩系型、含煤岩系型及表生沉积型 3 个亚类。

本方案新增加了碳酸盐岩型、碎屑岩型、侵入岩型、次火山岩型、浅变质岩型、中深变质岩型 6 个亚类。这 6 个亚类都有相应的富硒土壤成土母质类型,如碳酸盐岩型,较常见的成土母质有白云岩类风化物^[14]、泥质灰岩类风化物、灰岩类风化物^[8,23]。其他亚类对应的富硒土壤成土母质见表 1。次火山岩型、浅变质岩型(千枚岩类风化物)尚未见到公开报道,但与火山岩、泥质岩类化学组成类似,推断存在该类型富硒土壤。

3 天然富硒土壤开发适宜性评价

3.1 天然富硒土壤重要亚类的主要特征

如前所述,炭质硅质岩、炭质页岩、煤及煤系地

层、磷酸盐岩、火山岩碎屑岩是形成土壤硒地质高背景的主要原因^[1,9],加之分布面积较广,是天然富硒土壤的重要亚类。尤其是黑色岩系,在云南、贵州、广西、四川、湖南、湖北、江西、江苏、浙江、安徽等省份都有分布。此外,由于成土过程中硒的次生富集作用^[1],平原区也易形成富硒土壤,且开发条件好,具有重要利用价值。

3.1.1 黑色岩系型

代表性地区为浙江湖州、杭州、衢州,安徽石台,陕西安康,鄂西地区,贵州开阳等。主要富硒地层为寒武系下统荷塘组、留茶坡组、牛蹄塘组、鲁家坪组、剪竹坝组,二叠系中统孤峰组、大隆组,岩性以硅质岩、炭质硅质岩、硅质页岩、炭质页岩、含炭粉砂质泥岩、泥灰岩等为主。土壤硒含量高,局部达到毒硒程度($w(\text{Se}) > 3.0 \times 10^{-6}$)。土壤有效硒含量高,农产品富硒率高,如浙江安吉富硒区稻米富硒率为 100%^[36]。富硒土地常分布在丘陵盆地区,相对集中连片,源岩风化区土壤重金属含量高,农产品中存在一定程度的重金属超标现象;异地沉积区富硒土壤重

金属含量较源岩风化区显著降低,开发适宜性高^[7]。

3.1.2 含煤岩系型

代表性地区为浙江长兴、福建三明^[37]、湖北恩施。主要富硒地层为二叠系龙潭组、梁山组、翠屏山组,发育砂、泥岩夹煤线或透镜状煤层。土壤硒含量中等,有效硒含量中等,如长兴富硒区表层土壤硒极大值为 1.78×10^{-6} ,有效硒平均含量为 0.02×10^{-6} ,最大值为 0.08×10^{-6} ^[38]。土壤重金属含量较低,农产品富硒率低—中等,如恩施沙地,玉米籽实硒含量等级处于“中等”和“高”的样品所占比例为65.33%^[39]。富硒土地常分布在丘陵山区,集中连片程度低—中等,开发适宜性中等。

3.1.3 表生沉积型

代表性地区有浙江嘉兴、金华、常山、宁波,广东石鼓等地。主要富硒地层为第四系,土壤母质有湖沼相富含有机质砂泥质沉积物、全新世洪冲积物、湖相沉积物、早中更新世红土风化物等。土壤硒全量稍低,如嘉善富硒区硒含量 $0.40\times10^{-6}\sim1.296\times10^{-6}$,变异系数9.4%,硒含量空间变化小^[40]。土壤有机质含量较高,重金属含量低;农产品富硒率中等(>60%),重金属超标率低。富硒土地大多位于平原区,相对集中连片,开发适宜性中等—高。

3.1.4 火山岩型

代表性地区有福建寿宁、浙东沿海、海南等地。主要富硒地层为侏罗系、白垩系,岩性以酸性火山岩、中酸性火山岩及玄武岩类为主。土壤硒含量中等—高,有效硒含量低—中等。土壤呈酸性、强酸性(pH 4~6),重金属含量低,农产品富硒率低—高,变化较大。如寿宁富硒土壤研究区硒含量平均值为 0.44×10^{-6} ,稻米富硒率达到83.33%,茶叶不富硒^[20];海南岛基性火山岩区土壤硒平均值为 1.07×10^{-6} ,而有效硒平均值为 0.0129×10^{-6} ,有效度仅1.21%。富硒土地常分布在丘陵山区,少数在平原区,集中连片程度差异大,开发适宜性较差—中等。

上述4个富硒土壤亚类特征表明,影响富硒土壤开发的因素,除了土壤硒含量、硒的有效性外,还与土壤环境质量(重金属含量)、富硒土地面积、集中连片程度及富硒土地所处地貌景观等因素有关,其中土壤重金属含量的高低,即土壤污染风险高低对富硒土壤开发利用影响最大。基于风险管控原则^[41-42],可将天然富硒土地按土壤污染风险高低划分为:

优先保护类富硒土地(或称为绿色富硒土地):土壤中污染物(主要指重金属,下同)的含量不超过土壤污染风险筛选值时,土壤污染风险低,一般情况

下土壤污染风险可以忽略的天然富硒土地。

安全利用类富硒土地:土壤中的污染物含量超过风险筛选值,但低于土壤污染管制值时,可能导致食用农产品不符合质量安全标准的天然富硒土地。

严格管控类富硒土地:土壤中污染物含量高于风险管制值,土壤污染风险高,难以保证农产品食用安全性的天然富硒土地。

3.2 天然富硒土壤开发适宜性评价指标体系

按上述富硒土地类别划分原则,绿色富硒土地应首先开发利用,安全利用类富硒土地在一定条件下可开发利用,而严格管控类富硒土地一般不适合开发利用。因此,天然富硒土壤开发适宜性评价指标体系主要适用于绿色富硒土地和安全利用类富硒土地。

3.2.1 绿色富硒土地开发适宜性评价

根据富硒土壤资源的分布情况、土壤安全类别划定成果,可将绿色富硒土地按开发条件(影响富硒土地开发要素)进行规划分区、利用。开发条件包括:富硒土地面积、地形地貌、富硒土地集中连片程度、农作物富硒率、农业生产设施条件等5个要素。对各要素进行开发适宜性评价,分为适宜、较适宜、不适宜三级,分别赋值3、1、0,各要素适宜性判别标准如表2。

$$y = \sum_{i=1}^5 x_i。$$

式中: y 为富硒土地开发适宜程度; x 为影响富硒土地开发要素的取值。当 $y\geq13$ 时,为适宜开发; $7\leq y<13$ 且富硒土地面积 ≥300 亩时,为较适宜开发;富硒土地面积 <300 亩或 $y<7$ 时,为不适宜开发。

采用上述标准,对浙江海盐县澉浦镇富硒土壤开发适宜性进行评价。澉浦镇平原区富硒土壤面积约8000亩^[43],土壤硒含量 $0.40\times10^{-6}\sim0.79\times10^{-6}$,富硒区地势平坦,富硒土地集中连片分布在茶院、六里村等地,土壤重金属含量低,为绿色富硒土地,农业生产设施较完善,周边无潜在污染源,但稻米富硒率约64%,按表2逐项打分,结果显示富硒土地较适宜开发($y=12$),需要筛选更易富硒作物。目前,澉浦镇富硒土地已进行商业开发,并生产出富硒芦笋、富硒稻米及富硒果蔬等农产品。

3.2.2 安全利用类富硒土地开发适宜性评价

安全利用类富硒土地开发适宜性评价可参照绿色富硒土地开发适宜性评价方法,各要素判别标准参照表2执行,但适宜开发程度(y)标准有所不同。当 $y\geq13$ 时,为较适宜开发; $y<13$ 时,为不适宜开发。

表 2 绿色富硒土地开发要素适宜性评价

Table 2 Suitability evaluation of green selenium-rich land development factors

要素	评价标准	开发适宜性	赋值
富硒土地面积	≥300 亩	适宜	3
	<300 亩	不适宜	0
地形地貌	平原、盆地等地势平坦,坡度<6°	适宜	3
	谷地、丘陵、岗地等地势起伏较小,坡度 6°~15°	较适宜	1
	山地等地势起伏大,坡度>15°	不适宜	0
集中连片程度	富硒土地集中连片,土地利用现状图斑细碎化程度低	适宜	3
	富硒土地相对集中,图斑细碎化程度中	较适宜	1
	富硒土地分散,图斑细碎化程度高	不适宜	0
农作物富硒率	≥70%	适宜	3
	<70%	不适宜	0
农业生产设施条件	排涝能力强,基础设施完备,周边无潜在污染源	适宜	3
	排涝能力中等,基础设施基本齐全,周边无潜在污染源	较适宜	1
	排涝能力低,基础设施不齐全,周边可能有潜在污染源	不适宜	0

注:富硒土地面积、农作物富硒率评价标准取自文献[42]。

特殊情况下,当绿色富硒土地被安全利用类富硒土地分割或绿色富硒土地与安全利用类富硒土地紧邻,但绿色富硒土地和安全利用类富硒土地各自面积都小于 300 亩,而二者之和超过 300 亩时,可统一按安全利用类富硒土地评价其开发适宜性。

4 结论

天然富硒土壤常受控成土母质,基于母质差异,可将其分为沉积岩型、岩浆岩型及变质岩型等 3 类,进一步可细分为表生沉积型、黑色岩系型、含煤岩系型等 10 个亚类。不同成因类型的天然富硒土壤特征及开发适宜性差异较大,异地沉积的黑色岩系型、表生沉积型等绿色富硒土地开发适宜性高。

天然富硒土地开发适宜性可在富硒土地安全类别划分基础上,根据富硒土地面积、地形地貌、富硒土地集中连片程度、农作物富硒率、农业生产设施条件等 5 个要素的评价结果确定。

由于天然富硒土壤成土母质类型众多,本分类方案中的成因亚类还可根据新的富硒土壤母质类型进行补充,使该分类方案更加完善。

致谢:论文编写过程中得到浙江省地质调查院宋明义教授级高级工程师、康占军高级工程师的帮助;审稿专家在本文修改过程中提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

参考文献 (References):

[1] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法[J]. 岩矿测试, 2020,39(3):319-336.

Zhou G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020,

39(3): 319-336.

[2] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review [J]. Environment International, 2018, 112: 294-309.

[3] 鲍鹏,李国祥. 硒抗肿瘤机理研究进展和展望[J]. 生物技术进展,2017,7(5):506-510.

Bao P, Li G X. Progress and prospects of selenium anti-tumor mechanism[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 506-510.

[4] 李家熙,张光弟,葛晓立,等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京:地质出版社,2000.

Li J X, Zhang G D, Ge X L, et al. Prediction and geochemical environmental character of human Selenium imbalances [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.

[5] 宁夏回族自治区质量技术监督局. DB64/T 1220—2016 宁夏富硒土壤标准[S].

Quality and Technical Supervision Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. DB64/T 1220—2016 Ningxia selenium-rich soil standard [S].

[6] 衢州市质量技术监督局. DB 3308/T18—2012 富硒土壤评价标准[S].

Quzhou Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. DB 3308/T18—2012 Evaluation standard for selenium rich soil [S].

[7] 宋明义,黄春雷,董岩翔,等. 浙江富硒土壤成因分类及开发利用现状[J]. 上海地质,2010,31(s1):107-110.

Song M Y, Huang C L, Dong Y X, et al. Genetic classification and utilization situation of selenium-rich soil in Zhejiang Province [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(s1): 107-110.

[8] 贾十军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. 资源调查与环境,2013,34(2):133-137.

Jia S J. Evaluation standards and genesis of selenium-rich soil in Anhui Province [J]. Resources Survey and Environment, 2013, 34(2): 133-137.

[9] 王锐,余涛,曾庆良,等. 我国主要农耕地土壤硒含量分布特征、来源及影响因素[J]. 生物技术进展,2017,7(5):359-366.

Wang R, Yu T, Zeng Q L, et al. Distribution characteristics, origin and influencing factors of soil selenium concentration of main farming areas in China [J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5):

- 359–366.
- [10] 酃逸根,董岩翔,郑洁,等. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. 第四纪研究,2005,25(3):323–330.
- Li Y G, Dong Y X, Zheng J, et al. Selenium: Abundant soil survey and assessment in Zhejiang [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(3): 323–330.
- [11] Fordyce F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment [G]//Selinus O. Essentials of medical geology (revised edition). British Geological Survey, 2013:375–416.
- [12] 徐春燕,丁晓英,闫加力. 湖北省富硒资源的地质特征及利用区划[J]. 世界地质,2018,37(1):140–147.
- Xu C Y, Ding X Y, Yan J L. Geological characteristics and usage regionalization of Se-enriched resources in Hubei [J]. Global Geology, 2018, 37(1): 140–147.
- [13] 宋明义. 浙西地区下寒武统黑色岩系中硒与重金属的表生地球化学及环境效应[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
- Song M Y. Supergenic geochemistry and environmental effects of Selenium and heavy metals in the lower Cambrian black series of western Zhejiang Province, China [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [14] 刘道荣,徐虹,周漪,等. 浙西常山地区富硒土壤特征及成因分析[J]. 物探与化探,2019,43(3):658–666.
- Liu D R, Xu H, Zhou Y, et al. Characteristics and genetic analysis of selenium-rich soil in Changshan County, western Zhejiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 658–666.
- [15] 蔡子华,宋明义,胡艳华,等. 湖沼相富硒土壤的发现及其生态学意义[J]. 物探与化探,2011,35(2):248–253.
- Cai Z H, Song M Y, Hu Y H, et al. The discovery of lake facies Selenium-rich soil and its ecological significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 248–253.
- [16] 张建东,王丽,王浩东,等. 紫阳县土壤硒的分布特征研究[J]. 土壤通报,2017,48(6):1404–1408.
- Zhang J D, Wang L, Wang H D, et al. Distribution of soil total selenium in Ziyang, Shaanxi [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1404–1408.
- [17] 杨良策,李明龙,杨延安,等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. 资源环境与工程,2015,29(6):825–829.
- Yang L C, Li M L, Yang T A, et al. Study on distribution characteristics of Selenium content of surface soil and its influencing factors in Enshi City, Hubei Province [J]. Resources Environment and Engineering, 2015, 29(6): 825–829.
- [18] 全双梅,连国奇,秦趣. 贵州富硒资源开发利用对策研究[J]. 湖北农业科学,2013,52(24):6023–6025.
- Tong S M, Lian G Q, Qin Q. Measures for exploiting Se resources in Guizhou Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(24): 6023–6025.
- [19] 任海利,高军波,龙杰,等. 贵州开阳地区富硒地层及风化土壤地球化学特征[J]. 地球与环境,2012,40(2):161–170.
- Ren H L, Gao J B, Long J, et al. Geochemical characteristics of selenium-rich strata and weathered soil from Kaiyang County, Guizhou Province [J]. Earth and Environment, 2012, 40(2): 161–170.
- [20] 吴俊. 福建省寿宁县富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探,2018,42(2):386–391.
- Wu J. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Shouning County of Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(2): 386–391.
- [21] 傅杨荣. 海南岛土壤地球化学与优质农业研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2014.
- Fu Y R. Studies on soil geochemistry and high-quality agriculture in Hainan island [D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2014.
- [22] 黄子龙,林清梅,范汝海. 广西全州县富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探,2018,42(2):381–385.
- Huang Z L, Lin Q M, Fan R H. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Quanzhou County of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(2): 381–385.
- [23] 李杰,杨志强,刘枝刚,等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. 土壤学报,2012,49(5):1012–1020.
- Li J, Yang Z Q, Liu Z G, et al. Distribution of selenium in soils of Nanning City and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 1012–1020.
- [24] 文帮勇,张涛亮,李西周,等. 江西龙南地区富硒土壤资源开发可行性研究[J]. 中国地质,2014,41(1):256–263.
- Wen B Y, Zhang T L, Li X Z, et al. A feasibility study of selenium-rich soil development in Longnan County of Jiangxi Province [J]. Geology in China, 2014, 41(1): 256–263.
- [25] 周墨,陈国光,张明,等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究:以青塘—梅窖地区为例[J]. 现代地质,2018,32(6):1292–1301.
- Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of south Jiangxi Province: a typical area of Qingtang-Meijiao [J]. Geoscience, 2018, 32(6): 1292–1301.
- [26] 黄春雷,宋明义,魏迎春. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. 环境科学,2013,34(11):4405–4410.
- Huang C L, Song M Y, Wei Y C. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4405–4410.
- [27] 杨志强,李杰,郑国东,等. 广西北部湾沿海经济区富硒土壤地球化学特征[J]. 物探与化探,2014,38(6):1260–1264,1269.
- Yang Z Q, Li J, Zheng G D, et al. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1260–1264, 1269.
- [28] 宋明义,周宗尧,董学发,等. 宁波市富硒土壤资源调查与开发利用研究[J]. 广东微量元素科学,2013,20(2):19–25.
- Song M Y, Zhou Z Y, Dong X F, et al. Investigation of Se-rich soil resource in Ningbo and its development use research [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2013, 20(2): 19–25.
- [29] 朱海娣,毛雪,吴承龙,等. 石台县土壤硒资源分布特征及其利用[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(9):130–134,180.
- Zhu H D, Mao X, Wu C L, et al. Distribution characteristics of selenium resources and their utilization in Shitai County [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(9): 130–134, 180.
- [30] 刘军平,李静,段向东,等. 滇中易门地区富硒土壤物质来源及其天然富硒野生菌初步研究[J]. 地质论评,2020,66(3):786–794.

Liu J P, Li J, Duan X D, et al. Material sources of selenium-rich soil and its natural selenium-rich wild bacteria in Yimen area, central Yunnan [J]. *Geological Review*, 2020, 66(3): 786–794.

[31] 宋晓珂, 李宗仁, 王金贵. 青海东部农田土壤硒分布特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 755–761.

Song X K, Li Z R, Wang J G. Distribution and influential factors of soil Se in eastern Qinghai Province [J]. *Soils*, 2018, 50(4): 755–761.

[32] 朱青, 郭熙, 韩逸, 等. 南方丘陵区土壤硒空间分异特征及其影响因素——以丰城市为例[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 834–843.

Zhu Q, Guo X, Han Y, et al. Spatial differentiation of soil selenium in hilly regions of South China and its influencing factors: A case study in Fengcheng City [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 834–843.

[33] 罗思亮, 游远航, 刘子宁. 台山市西北部土壤硒分布特征[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(4): 1508–1510.

Luo S L, You Y H, Liu Z N. Distribution of selenium in soil in the northwest of Taishan City [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2013, 41(4): 1508–1510.

[34] 董岩翔, 郑文, 周建华, 等. 浙江省土壤地球化学背景值[M]. 北京: 地质出版社, 2007.

Dong Y X, Zheng W, Zhou J H, et al. Soil geochemical background in Zhejiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.

[35] 方平辉, 吴春晖, 杜雄, 等. 龙游县土地质量地质调查报告[R]. 浙江省第一地质大队, 2020.

Fang P H, Wu C H, Du X, et al. Geological survey report of land quality in Longyou County [R]. The First Geology Group of Zhejiang Province, 2020.

[36] 宋明义, 岑静, 胡艳华, 等. 高镉地质环境富硒土壤特征及其生态效应[J]. *地球与环境*, 2012, 40(3): 354–360.

Song M Y, Cen J, Hu Y H, et al. Study on the characteristics of selenium-rich soil under geological environment with high contents of cadmium and its ecological effects [J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(3): 354–360.

[37] 何伟燕, 王占岐. 福建典型富硒区表层土壤全硒含量的分布特征[J]. *贵州农业科学*, 2015, 43(3): 86–90.

He W Y, Wang Z Q. Distribution feature of total selenium in surface soil of typical selenium rich area in Fujian [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43(3): 86–90.

[38] 龚淑英, 邹新荣, 徐平, 等. 浙江省长兴县富硒资源区及富硒农产品的调研[J]. *茶叶*, 2010, 36(4): 221–226, 231.

Gong S Y, Wu X R, Xu P, et al. An investigation on selenium-enriched agricultural products in Changxing County of Zhejiang Province [J]. *Journal of Tea*, 2010, 36(4): 221–226, 231.

[39] 曾庆良, 余涛, 王锐. 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*, 2018, 32(1): 105–112.

Zeng Q L, Yu T, Wang R. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei [J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 105–112.

[40] 宋明义, 刘建新, 黄春雷. 浙北富硒土壤地球化学特征与生物学效应[J]. *广东微量元素科学*, 2012, 19(3): 32–38.

Song M Y, Liu J X, Huang C L. Geochemical characteristics and biological effects of selenium-rich Soil in Northern Zhejiang [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2012, 19(3): 32–38.

[41] 生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].

Ministry of Ecological Environment. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].

[42] 中国地质调查局. DD2019-10 天然富硒土地划定与标识(试行)[S].

China Geology Survey. DD2019-10 Delimitation and the logo for natural selenium-enriched land [S].

[43] 康占军, 卢新哲, 岑静, 等. 浙江省海盐地区多目标地球化学调查成果报告[R]. 浙江省地质调查院, 2016.

Kang Z J, Lu X Z, Cen J, et al. Report on the results of multi-objective geochemical survey in Haiyan area, Zhejiang Province [R]. Zhejiang Institute of Geological Survey, 2016.

Assessment of genetic classification and
development suitability of natural selenium-rich soil

LIU Dao-Rong¹, JIAO Sen²

(1. Zhejiang Geological Prospecting Institute, China Chemical Geology and Mine Bureau, Hangzhou 310002, China; 2. China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100013, China)

Abstract: The formation of natural selenium-rich soil tends to be controlled by the parent materials. Spatially, it is closely related to the distribution areas of selenium-rich rocks such as black rock series, coal-bearing rock series, carbonaceous mudstones (shales), argillaceous limestones, and volcanic rocks. Selenium-rich soil of different genetic types greatly differs in development suitability. However, a genetic classification scheme of natural selenium-rich soil is yet to be developed. This paper sorted out the genesis of natural selenium-rich soil and divided it into three categories and 10 subclasses according to the major controlling factor of selenium source in soil (parent materials) based on existing classification schemes. Then it briefly reviewed the primary characteristics and development suitability of selenium-rich soils of four major subclasses, i.e., black rock series, coal-bearing rock series, volcanic rocks, and epimetamorphic rocks. Based on this, this study proposed assessment indices of the development suitability of natural selenium-rich soil.

Key words: natural selenium-rich soil; parent materials; genetic classification; development suitability

(本文编辑: 蒋实)