

doi: 10.12029/gc20231011002

张素荣, 汪大明, 杨俊泉, 张静, 王建华, 张东辉, 仝云霄, 靳职斌, 陈东磊. 2024. 土壤中元素遥感定量反演研究进展与展望[J]. 中国地质, 51(5): 1664-1675.

Zhang Surong, Wang Daming, Yang Junquan, Zhang Jing, Wang Jianhua, Zhang Donghui, Tong Yunxiao, Jin Zhibin, Chen Donglei. 2024. Quantitative remote sensing inversion of elements in soils: Advances in research and future prospects[J]. Geology in China, 51(5): 1664-1675(in Chinese with English abstract).

## 土壤中元素遥感定量反演研究进展与展望

张素荣<sup>1,2</sup>, 汪大明<sup>1,2</sup>, 杨俊泉<sup>1,2</sup>, 张静<sup>1,2</sup>, 王建华<sup>3</sup>, 张东辉<sup>4</sup>, 仝云霄<sup>1,2</sup>,  
靳职斌<sup>5</sup>, 陈东磊<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170; 3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; 4. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100095; 5. 山西省地球物理化学勘查院有限公司, 山西 运城 044004)

**摘要:**【研究目的】土壤质量的优劣与人类生活密切相关。鉴于传统的土壤调查方法无法满足大面积土壤质量的动态监测需求, 如何发挥高光谱遥感技术宏观、实时、原位、快速等优势进行土壤元素定量反演已成为遥感应用领域的热点和难点。【研究方法】文章围绕土壤元素的直接定量反演、利用土壤中元素相关性的间接定量反演以及基于植物光谱的土壤元素定量反演三种遥感定量反演方法, 系统总结了其主要原理、优势与研究现状, 从学科交叉融合角度展望了相关领域未来发展方向。【研究结果】当前常用的土壤元素定量反演方法均难于大范围推广应用。相比而言, 利用植物叶片或冠层的光谱间接反演土壤元素含量的方法可信度更高。利用生态地球化学领域的研究成果, 有助于找到目标元素在不同植物中特有的光谱学效应信息, 解码基于植物光谱的土壤元素定量反演原理。【结论】推进学科交叉融合, 深化基于大数据挖掘和土壤理化性质的研究, 是突破土壤元素广域监测技术瓶颈的有利发展方向。

**关键词:** 土壤元素; 植物缺素反应; 生态地球化学; 大数据; 遥感定量反演; 农业地质调查工程

**创新点:** 在系统梳理三种土壤元素定量反演基础上, 立足学科交叉融合, 提出深化基于大数据挖掘和土壤理化性质的研究等, 为土壤元素广域监测技术的发展指明方向。

中图分类号: P237; S151.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1664-12

## Quantitative remote sensing inversion of elements in soils: Advances in research and future prospects

ZHANG Surong<sup>1,2</sup>, WANG Daming<sup>1,2</sup>, YANG Junquan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, WANG Jianhua<sup>3</sup>,  
ZHANG Donghui<sup>4</sup>, TONG Yunxiao<sup>1,2</sup>, JIN Zhibin<sup>5</sup>, CHEN Donglei<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Centre (North China Center for Geoscience Innovation), China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Tianjin Key

收稿日期: 2023-10-11; 改回日期: 2023-11-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42272346)和中国地质调查局项目(DD20230101)联合资助。

作者简介: 张素荣, 女, 1981年生, 硕士, 正高级工程师, 主要从事生态地球化学和遥感应用方面的研究; E-mail: zhangsurong@126.com。

通讯作者: 杨俊泉, 男, 1980年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事自然资源调查监测、遥感应用、地质矿产调查等方面的科研及生产工作; E-mail: dap-yangjunquan@163.com。

Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China; 3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100095, China; 5. Shanxi Geophysical and Chemical Exploration Institute Co., Ltd., Yuncheng 044004, Shanxi, China)

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

**[Objective]** Soil quality is closely related to human activities. Given that traditional methods fall short in achieving the large-scale dynamic monitoring of soil quality, the quantitative inversion of elements in soils using hyperspectral remote sensing, which proves macroscopic, real-time, in-situ, and fast, has emerged as a hot topic and challenge in the field of remote sensing application.

**[Methods]** This paper explores three methods for quantitative remote sensing inversion of elements in soils: direct quantitative inversion, indirect quantitative inversion using correlations among the elements, and quantitative inversion based on plant spectra. Specifically, this paper systematically summarizes the primary principles, advantages, and current research status of these methods and proposes future trends in relevant fields from the perspective of interdisciplinary integration. **[Results]** The commonly used methods for the quantitative inversion of elements in soils face challenges when applied on a large scale. Among these, the indirect inversion based on the spectra of plant leaves or canopies is considered the most reliable. Achievements in ecological geochemistry enable the identification of the unique spectral effects of target elements in different plants, which assists in determining the principle of the plant spectrum-based quantitative inversion of elements in soils. **[Conclusions]** More in-depth research based on big data mining and the physicochemical properties of soils while promoting interdisciplinary integration represents a favorable direction for achieving breakthroughs in wide-area monitoring technology for elements in soils.

**Key words:** element in soil; nutrient deficiency response of plant; ecological geochemistry; big data; agricultural quantitative remote sensing inversion; agricultural geological survey engineering

**Highlights:** Based on a systematic review of three methods for the quantitative inversion of elements in soils, this paper proposes deepening the research based on big data mining and soils' physicochemical properties by promoting interdisciplinary integration. This represents the future trend in wide-area monitoring technology for elements in soils.

**About the first author:** ZHANG Surong, female, born in 1981, master, professor level senior engineer, engaged in research on ecological geochemistry and remote sensing applications; E-mail: [zhangsurong@126.com](mailto:zhangsurong@126.com).

**About the corresponding author:** YANG Junquan, male, born in 1980, doctor, professor level senior engineer, engaged in scientific research and production of natural resource survey and monitoring, remote sensing application, and geological and mineral survey; E-mail: [dap-yangjunquan@163.com](mailto:dap-yangjunquan@163.com).

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42272346) and the project of China Geological Survey (No.DD20230101).

## 1 引言

土壤是农业生产的重要载体和生态环境的主要组成,其质量的优劣直接影响到人们的生活(张栋等, 2023)。土壤中包含多种对植物生长和人类健康密切相关的养分元素、微量元素和重金属元素等,元素过量或缺乏都会影响植物的正常生长,甚至威胁到人类和动物的营养和健康(肖海龙等, 2022; 赖书雅等, 2023; 赵鑫娜等, 2023)。目前国际社会的土壤调查可分为四类,包括土壤分类调查、农田土壤基础地力调查与评价、科学施肥和耕地保育所需土壤化学性状的采样调查及以环境质量为

主题的土壤调查,中国相关的系统调查主要有 1958—1960 年和 1978—1990 年间由国务院批准实施的全国第一次和第二次土壤普查,及 2022 年启动的第三次全国土壤普查,属以查清土壤发生类型及其分布特征为主要内容的土壤分类调查(张维理等, 2022)。此外,自 20 世纪 90 年代末期以来,中国地质调查局主导实施了多目标区域地球化学调查计划,在平原、盆地、三角洲等农耕地采集表、深层土壤样品,研究了土壤中 54 种元素指标的分布、分配规律,并探究了元素成因来源及其在生态地球化学系统的迁移途径、转化规律及作用机理等(奚小环, 2005)。总体而言,涉及土壤中元素含量的调

查通常依赖于野外采集样品的化学分析,该方法调查精度高、实验室检测精密度高、检出限低,但检测周期较长,且采样和分析测试成本较高,无法满足大面积的土壤质量和土壤重金属污染动态监测等需求(张静静等, 2018; 郭学飞等, 2020)。虽然近年中国地质调查局已建立了五年全更新的土壤质量监测机制,但基于传统采样分析的方法技术,仍然不能从根本上满足土壤质量的监测需求。

随着国内外各类高光谱遥感技术的发展和进步,其宏观、实时、原位、快速、对险恶地形地貌的适用性等突出优势,及可同时记录地物多个窄波段的反射率,使本来在常规遥感中不能识别的地物,在高光谱曲线中能得到有效的识别(Hunt, 1979)。因而,通过高光谱技术监测土壤中元素含量的变化成为可能(Moros et al., 2009; 涂晔昕和费腾, 2016),结合传统地面采样分析,为开展大面积土壤质量的动态监测提供了新的机遇。国内外学者对高光谱遥感技术在土壤重金属含量测定领域的应用开展了大量研究,并取得了长足的发展。以土壤、遥感为关键词在知网进行检索,共 13366 篇文献:记录最早的时间是 1993 年、52 篇,2000 年来发文量呈直线式急剧增长,2020 年顶峰时达到了 995 篇,近 30 年总体上达到近 20 倍增长。WOS(Web of Science)上同样以 soil 和 remote sensing 检索,自 2000 年来就有相关文献 39049 篇,是国内文献数量的近 3 倍。已有文献有关土壤元素含量的反演研究方面, Cr、Cd、Cu、Zn、Fe、Ni、As、U、Se 等有益有害元素, N、P、K 等养分元素, 及有机碳的研究较多。综合梳理发现,土壤元素定量反演的技术方法可归结为三类:土壤元素的直接定量反演、利用土壤中元素相关性的间接定量反演和基于植物光谱的土壤元素定量反演。

本文在梳理三类反演方法原理、主要优势和土壤-植物系统元素迁移富集规律等基础上,探讨了土壤元素定量反演的未来发展方向, 以期对相关研究提供参考,并为大面积原位监测土壤中元素含量的变化拓展新的思路。

## 2 土壤元素定量反演的技术方法

### 2.1 土壤元素的直接定量反演

该类反演方法较为常见,其主要原理是通过分

析土壤化学元素含量与土壤光谱反射率之间的相关性,直接建立反演模型提取土壤中的元素含量(刘彦平等, 2020)。此种方法在探索土壤的氮、磷、钾等常量营养元素(Confalonieri et al., 2001; Ji et al., 2014; Yu et al., 2018; Carra et al., 2019)、土壤盐分(Bouaziz et al., 2011; Allbed and Kumar, 2013; Garajeh et al., 2021)、有机质(Wang et al., 2016; 汪大明等, 2018; Wei et al., 2020)方面已经取得了广泛应用。近年来,随着机器学习技术方法的不断成熟,越来越多的研究将此方法应用于土壤中微量元素含量反演(图 1)。

由于土壤光谱法测定的是土壤中有机质、氧化铁、黏土矿物和其他物质的总反射率,其中微量元素的含量通常都是  $10^{-6}$  级,使用普通光谱法单独估算其含量较为困难,因此,学者们往往要对原始光谱进行各种光谱变换、突出变化特征,再提取特征谱段(Gholizadeh et al., 2018)。主要的光谱变换方法有一阶微分(FDR)、二阶微分(SDR)、倒数、对数、均方根变换、逆对数(LR)、连续统去除(CR)、连续小波变换(CWT)、多次散射校正(MSC)、扩展

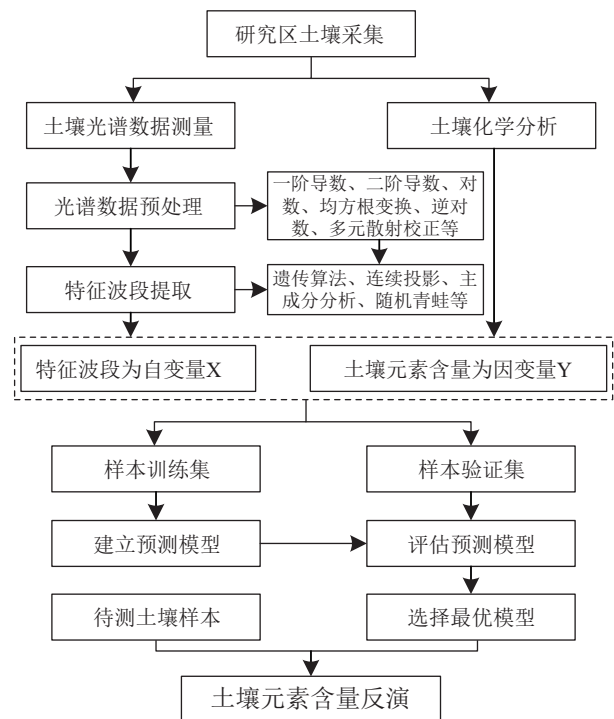


图 1 土壤元素直接定量反演流程图

Fig.1 Flow chart of direct quantitative inversion of soils elements

散射校正平滑等。光谱变换后再利用遗传算法、连续投影等算法提取元素的特征谱段, 结合逐步回归、多元回归、偏最小二乘法、神经网络、支持向量机、随机森林等统计模型, 构建出土壤元素含量的反演模型(Khosravi et al., 2018)。大量的研究结果已经证明, 光谱变换后的结果, 有效减弱或消除了微量元素受土壤中存在的有机质或氧化物产生的光谱特征, 结合最新的机器学习算法, 反演精度有了进一步提升。

传统的土壤取样测试分析, 都是以一定间距或网度获取采样数据, 再经过插值等方式形成区域元素分布图。因为有星载或机载光谱数据作为支撑, 数据源由点源变换成为面源。因此, 上述反演方法最直接的应用效果, 就是可以显著提升元素分布图的精度。

## 2.2 利用土壤中元素相关性的间接定量反演

鉴于土壤中微量元素含量太低、对其直接建模的难度大, 一些学者根据其相关元素或化合物进行间接反演, 即基于探测元素与土壤中其他含量相对较高的物质(例如有机质、土壤盐分等)的赋存关系, 先建立土壤光谱反射率与这些物质含量的反演模型, 再间接得到目标元素的反演模型。

东北黑土地微量元素反演即采用了此种方式: 针对海伦市黑土区, 通过主成分分析、聚类分析确定了主量元素氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )与微量重金属 As、Zn、Cd 之间存在明显吸附赋存关系, 从而通过神经网络构建了氧化铁预测值与重金属真实值之间的非线性拟合模型(王建华等, 2021); 在黑龙江建三江黑土地地区设计了一种先利用 BP 神经网络建立四种有机质、全铁、pH 和氧化钙成分含量的光谱反演模型, 再基于四种物质与硒元素相关关系, 间接反演硒元素含量的方法(张东辉等, 2019)。

此外, 有的学者通过建立铁和铜之间的线性和 BP 神经网络模型, 对铁矿区复垦土壤中的铜含量进行了间接反演, 并证明该方法相比直接反演, 在高铁浓度的围垦区、对高吸附性且与铁元素有聚集关系的重金属元素更为有效(Shen et al., 2019)。还有学者提出了一种光谱指数和黏土矿物中富集金属元素联合的新三波段光谱和金属元素指数(TSMEI), 先反演土壤中 Fe、K、Al、Mg 含量, 再基于反演结果和 TSMEI 反演砷

(As) 浓度(Fu et al., 2022)。

相比前述的土壤元素直接定量化反演, 利用土壤中元素相关性的间接反演增加了结果的可信度, 对土壤中微量元素反演有重要的实用价值。

## 2.3 基于植物光谱的土壤元素定量反演

土壤的营养供给会改变植物的营养状况, 同样, 在受到土壤重金属胁迫时, 植物本身也会有一定的映照(张立周等, 2010)。植物在土壤中以主动运输的方式吸收微量元素。土壤中任何一种微量元素过量或缺乏都会影响植物的正常生长, 甚至威胁到人类和动物的营养和健康(肖海龙等, 2022)。早在 2007 年就有实验证明, 随着土壤砷浓度的增加, 杂交水稻的叶绿素受到一定的影响, 表明砷中毒影响了光合作用, 最终导致水稻生长和产量下降(Rahman et al., 2007)。对葡萄幼苗分别用 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 等 5 种重金属进行处理, 发现每种重金属都有其特殊的作用, 并根据植物种类的不同对其产生不同的响应(包括叶色变化、黄化、坏死、矮化、巨大、叶片和根系扩张等), 证明重金属胁迫对葡萄叶片生化成分和叶片结构的影响(Mirzaei et al., 2019)。锌会影响碳水化合物的代谢、参与生长素的合成(梅忠等, 2016), 植物缺锌的症状主要包括有小叶与叶片畸形(尤以胡椒、荔枝、芒果等表现突出)、树体生长缓慢(形成矮化苗)、果实产量大幅降低(孙桂芳和杨光穗, 2002)。不同植物缺素表现存在差异(表 1, 图 2), 有关情况可参阅粮食作物、经济作物、药用植物、园艺作物等多领域植物的营养缺素研究进展(张丽霞等, 2010)。

植物的光谱反射或反射特性是由其化学和形态学特征决定的(童庆禧等, 2006), 而这些特征又和土壤的供给相关联。因此, 基于高光谱遥感的窄波段特性就被用来定量反演土壤的物理和化学参量。该类定量反演的常见流程为: 以高光谱遥感影像和野外采集的土壤样本数据为基础, 分析植被光谱反射率与土壤中元素含量之间的相关性, 建立土壤中元素含量与高光谱影像植被反射率或植被指数之间的估算模型。如 Qiao et al. (2022) 研究了两种土壤磷水平下, 不同玉米品种光谱特征、性状、叶面积指数(LAI)以及产量的变化, 证明了磷胁迫对多数品种 LAI 和产量均有显著影响, 验证了利用现有植物指数预测不同土壤磷含量下叶面积指数和

表 1 部分有益微量元素缺乏或过量对植物的影响

Table 1 Impacts of the deficiency or excess of partial beneficial trace elements on plants

元素	植物缺乏表现	元素过量植物中毒症状	参考文献
铁	新叶缺绿黄白色，叶脉颜色仍显绿。秋梢枝叶最严重，小枝枯死果变小。不同植物有区别，双单子叶要分开。网纹花叶双子叶，条纹花叶单子叶。植物缺乏症见有果树黄叶病	不同植物铁中毒症状不一：亚麻产生暗绿色叶片；烟草产生暗褐色至紫色叶片，烟叶脆弱且质量变劣；菜豆叶片上产生黑色斑点；水稻从下部叶位的尖端开始出现褐色斑点，然后扩展至整个叶片，再继续发展至上部叶片，最后下部叶片转变成灰色或白色	
锰	幼叶叶肉变黄白，脉和脉近仍绿色，脉纹清晰是症状，主脉较远先发黄。严重叶片褐细点，逐渐增大布叶面。典型缺乏症如黄斑症	典型症状一般表现为老叶边缘和叶尖出现许多焦枯褐色的小斑并逐渐扩大，斑块上出现锰氧化物沉淀	
硼	植株尖端易发白，芽生长易枯萎。生长点下易萌生植株分枝成丛状。新叶粗糙成淡绿叶片皱缩易变脆。柄茎粗短常开裂水渍斑点环状节。常见花而不实	一般症状：首先老叶叶尖或叶缘褪绿，接着叶尖或叶缘出现黄褐色的坏死斑，斑点扩展到侧脉间并伸向中脉，最后导致叶片坏死或呈枯萎状，并过早脱落	陈兴福, 1994; 罗俊丽等, 1998; 曾慧珍等, 2013;
锌	节间短促株矮小，叶片受阻出小叶。新叶灰绿或黄白，细看脉间和中脉。中脉附近先失泽，严重坏死成褐点。典型缺乏症如玉米“花白叶病”和果树“小叶病”	在作物中主要累积于根部。从形态上看，锌过量时植株矮小，叶片黄化，叶片、叶柄形成红褐色斑点，可以出现在各个叶位	丛迎新, 2019; 刘长兵等, 2022
铜	叶绿素浓度和稳定性降低，由叶尖开始发生缺绿病，稍枯成丛状。如梨树的“枯顶病”；禾本科作物叶色变白，叶子边缘呈黄灰色，严重时不能抽穗	降低种子的发芽率，抑制细胞分裂、抑制根生长，从而使植株矮小，叶片失绿、变黄。苹果表现为叶片呈网状失绿，叶片黄色或黄白色，边缘褐色干枯，严重时部分叶片枯死	
钼	新叶正常老叶变，叶片发黄出斑点。脉间叶肉色变淡，边缘焦枯向内卷。十字花科不一样，叶片扭曲螺旋状	在大田条件下植物钼中毒情况不易显现。在极端高浓度钼的条件下，可观察到植物钼中毒症状。表现为叶片褪绿、黄化且畸形、茎组织呈金黄色，作物减产和农产品品质下降	

注：元素缺乏与中毒症状由于植物种类、营养物质及土壤环境的不同差异较大，研究时需结合具体情况分析。

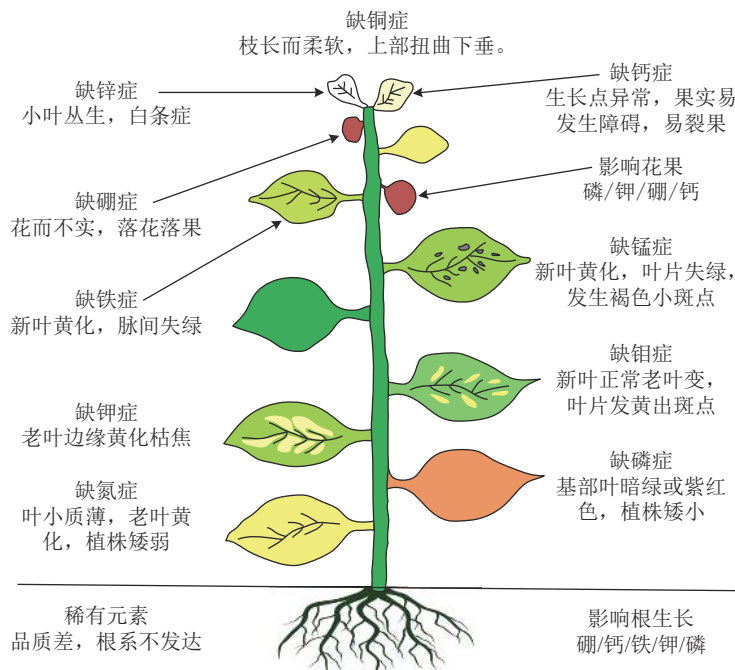


图 2 植物缺素在叶片的表面特征

Fig.2 Nutrient deficiency-induced surface characteristics of plant leaves

产量的可行性。杨灵玉等 (2016) 探讨了利用 Hyperion 影像植被光谱估算土壤 As、Pb、Zn、Cr 等 4 种重金属含量的可行性，基于土壤的实测含量数

据以及植物光谱数据构建的植物指数，利用偏最小二乘回归方法 (PLSR) 建立了基于植物指数的玉树县土壤中 Zn 和 Cd 含量的粗略估算模型。屈永华

等(2015)、Shi et al. (2016)探索了一种基于统计分析从国产高光谱数据中实现特征波段发现与重金属含量提取的方法,选取基于叶片的铜离子浓度反映重金属的污染程度,发现叶绿素含量的变化与铜含量变化具有相关光谱特性,采用逐步多元线性建立起野外实测含量值与对应高光谱遥感图像光谱数据的反演模型,提取了植物覆盖区域的铜污染情况测定了水稻拔节—孕穗期田间冠层的反射光谱,利用三波段植物指数建立了多元线性回归模型估算土壤砷含量。

无论是从植物性状和形态随微量元素含量变化的原理来看,还是已有的成功研究案例来说,利用植物叶片或冠层的光谱反演土壤元素含量的方法都是可行的。鉴于植物对土壤中某些元素含量的微小变化响应较为敏感,若能提取植被光谱异常信息并加以充分利用,找到目标元素在不同植物中特有的光谱学效应信息,定会为高光谱遥感土壤调查技术带来新的机遇。此种方法相对于前两种更易于从物理学原理上予以解释、可信度更高。

### 3 讨论与展望

#### 3.1 三种主要定量反演方法的应用前景

由前述三种技术方法的原理可知,土壤元素的遥感定量化反演通常都需要实验室测试的土壤元素含量作为训练样本,且这些样本要尽可能与光谱测量同期以保证反演精度,传统采样检测元素含量所面临的分析时间长、成本高、流程复杂等问题并未得到解决。同时,土壤反射率光谱与元素含量之间通常是并非完美的线性关系,加之土壤的理化性质、周围环境扰动千差万别,导致高光谱遥感数据和土壤组分含量的对应关系难以准确建立(成永生和周瑶, 2021),造成了土壤反演目标元素的有限性、反演地域的局限性。另外,土壤高光谱数据采集也存在一定的短板,如必须在裸露土壤或者是土壤裸露期间进行高光谱数据采集,时间窗口窄,且土壤中微量元素含量较低,其引发的光谱反射率变化信息微弱,利用土壤光谱反演其含量的方法饱受质疑,虽然利用植物对微量元素的敏感特性可以在反演土壤元素含量方面取得一些效果,但反演过程中要求有先验条件。因此,当前三种主要定量反演方法仍难以大范围推广应用。

然而,上述应用方面存在的难点仍不能妨碍几类遥感定量方法的发展。在具备地面调查条件的区域,不仅可以利用土壤元素的直接定量反演提升调查精度,还可以形成丰富的土壤元素光谱反演模型,配合土壤中元素相关性间接定量反演方法对微量元素信息诊断,有助于提升人类当前认知范围内的规律发掘、拓展反演目标元素的种类;对于受植被干扰影响较大的区域,基于植物光谱的土壤元素定量反演将干扰因素转变为信息源,既可弥补前两种方法在植被覆盖区应用的短板,又有利于从物理学角度理解并构建微量元素含量与光谱对应关系。

#### 3.2 学科交叉融合是解码定量反演原理的密钥——以遥感技术与生态地球化学交叉为例

遥感技术最早产生于 20 世纪 60 年代,在成为一门新兴的交叉科学技术后得到了迅猛发展(童庆禧等, 2016; 王建华等, 2022)。生态地球化学作为研究元素地球化学分布、分配状态与生态环境之间关系的科学(奚小环, 2004),其形成的是以大气-水体-土壤-生物体为循环系统的异常追踪和迁移途径的研究成果(杨忠芳等, 2005)。推进该学科与遥感技术的融合,必然可为植物光谱-土壤元素的遥感定量反演提供新的思路。

上文已述及,利用植物叶片或冠层的光谱反演土壤元素含量的方法相较其他两种方法可信度更高。因此,本文以基于植物光谱的土壤元素定量反演为例,论述生态地球化学领域研究带来的启示。

##### 3.2.1 土壤-植物间元素迁移的相关性

在元素通过食物链作用于人类健康的前期过程中,土壤-作物间的元素迁移发挥了重要作用。已有研究表明,土壤与作物中多种元素相关性较强。在福建铁观音茶园的研究发现,茶叶与土壤 Pb、Cr 具有显著正相关性(周国华等, 2015)。通过研究辽宁北部地区硒元素在岩石-土壤-植物中的释放-迁移-吸收特征与数量变化规律,发现土壤和水稻、土壤和榛子之间硒含量存在显著的正相关(丁秋红等, 2021)。陕西岚皋县的有关研究发现,白芨、木香、芍药、栝楼、重楼、葛根、绞股蓝、黄连等药用植物和桑葚、香椿的硒含量和对应土壤硒含量在 0.01 水平极显著相关;水稻、玉米和对应土壤硒含量在 0.05 水平显著相关(张建东等, 2022)。而有

关土壤有机质和 pH 对硒和重金属在土壤-水稻系统中迁移影响的研究发现,水稻籽实 Se 含量与土壤 pH 和有机质含量呈显著负相关(洪涛等, 2022)。

然而,土壤与作物中的元素分布规律并不一定完全对应,土壤富硒但农产品不富硒是常见现象。这是因为元素在自然界中的分布、迁移和转化,与其自身、依附载体和所处环境的理化性质密切相关,包括元素的地球化学行为、成因来源,赋存土壤的 pH 值、有机质含量、黏土矿物、化学活性矿物、土壤中矿物的粒度大小等理化条件,以及植物的根际效应等(周国华, 2020)。图 3 显示了水稻土壤-籽实系统中一些微量元素的吸收、转运和积累机制。元素的这些理化性质,决定了土壤-作物间元素迁移的复杂性。

生态地球化学领域的研究通常用土壤的生物有效性来作为解释这一复杂性的关键因素,一般将土壤微量元素的生物有效量与其全量的比值定义为土壤元素的有效度。显然,植物中的元素含量与土壤中相应元素的有效量是存在必然联系的。

### 3.2.2 土壤-植物间元素富集规律

微量元素是植物组成酶、维生素和生长激素的成分,直接参与有机体的代谢过程,具有非常关键的生理生化作用。研究表明,水稻和小麦等植株各部位微量元素的摄取和积累量,总体遵循根>茎/叶>颖壳>籽粒的大小顺序(Khanam et al., 2020; 冯敏铃等, 2022; 王成尘等, 2022)。但不同作物的不同生育期、不同器官/部位,转运和吸收不同微量元素的特征是存在差异的。笔者在饶阳县生态地球化学研究中,对 Zn、Cu、Mo 等元素在区内小麦、玉米、茄子、葡萄等主要农作物的分布情况研究发现, Zn 元素在玉米各器官的富集规律为茎叶>籽实>根系、在小麦体内则为籽实>根系>茎叶, Se 元素含量在玉米和小麦体内表现为根系>茎叶>籽实(王昌宇等, 2019)。其他团队针对玉米根和叶对 Ni、Cu、Zn 等重金属元素迁移、富集能力的研究表明,各器官吸收这些重金属的能力普遍较强,但籽实中 Zn 富集能力显著强于茎部(谷周雷等, 2021)。

植物器官内成分受生长期或季节影响的现

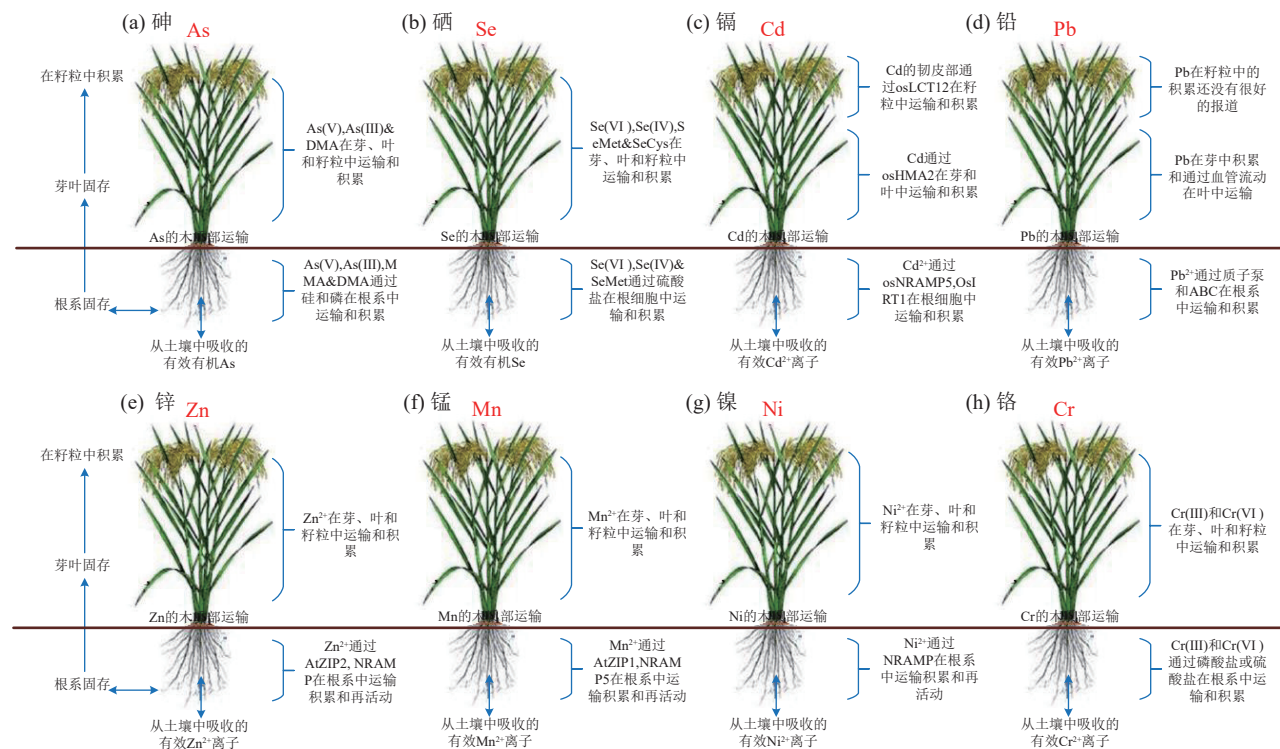


图 3 水稻土壤-籽实系统中微量元素的吸收、转运和积累机制(引自 Ali et al., 2020)

Fig.3 Mechanisms of absorption, transport and accumulation of trace elements in the soil-seed system of rice (after Ali et al., 2020)

象也已被证实。在土壤硒含量分别为 4 mg/kg、8 mg/kg、12 mg/kg 和 16 mg/kg 的实验条件下, 不同小麦品种在开花期营养器官的干物质分配量表现为茎秆+叶鞘>穗轴+颖壳>叶片, 而在成熟期为籽粒>茎秆+叶鞘>穗轴+颖壳>叶片(姜宗昊, 2020)。采用盆栽试验方法研究不同生育期水稻各部位对硒的吸收累积状况, 发现水稻营养器官生物量在拔节期积累最快, 根中的硒在拔节期达到最大, 根和茎中的硒在灌浆期和成熟期被转运至其他部位(张城铭等, 2017)。

### 3.2.3 有关启示

基于植物光谱的土壤元素定量反演面临的关键问题是, 如何有效提取并利用植被光谱异常信息, 找到目标元素在不同植物中特有的光谱学效应信息。

结合上述生态地球化学领域研究成果, 根据作物不同生育期、不同器官/部位转运和吸收微量元素的差异性, 可以构建出一系列植物光谱特征与微量元素的模型。以测量小麦中的 Zn 元素为例: 小麦的 12 个生育期中, 在起身期及之前, 露出地表的均以叶片为主; 拔节期、孕穗期, 暴露地表的部分以茎、叶为主; 抽穗期、开花期, 地表以茎、叶、穗混合为特征; 灌浆期、成熟期, 麦穗在顶端集中、籽粒逐渐变硬, 是该时段小麦植株最典型的特征。获取作物不同时期、不同部位的元素含量实测值, 以及相应的地面 ASD 光谱特征, 可以构建一系列光谱模型, 从而有望找到最适合用以反演目标元素含量的生育期、作物器官, 以确定元素在作物中特有的光谱学效应信息, 进而利用植物光谱反演出植物中的元素含量, 并在此基础上构建植物光谱-植物元素含量-土壤中元素的生物有效量的模型。

元素的有效量可以视作该元素在其所处环境综合影响下的产物, 结合土壤理化性质分析研究, 构建以土壤元素生物有效量为核心的植被反演模型, 便具备了大范围推广应用的基础。

### 3.3 数据驱动研究有望突破土壤元素广域监测的技术瓶颈

大数据学科本身也是一个多学科交叉融合的新兴学科, 主体是统计学和计算机科学。在软硬件计算条件、人工智能算法快速发展背景下, 基于数据驱动的方法, 无须任何假设和先验知识, 通过对

大量数据样本信息挖掘, 构建输入与输出数据对之间的特征关系, 就能够获取丰富的统计特征(张良培等, 2022)。大数据及机器学习技术在解决复杂非线性关系问题方面已经体现出巨大的优势(欧阳渊等, 2023)。

为满足空间大尺度快速、实时、连续监测土壤元素含量及空间分布的需求, 笔者认为可以充分利用大数据学科数据驱动的优势, 深化基于大数据和土壤理化性质的研究。一方面, 随着研究的不断深入, 土壤元素定量反演的模型将会越来越丰富, 这也意味着不同理化背景条件下的反演模型越来越多, 将这些模型结合理化背景进行分析, 借助大数据分析手段剖析模型间的区别和联系, 确定影响相关光谱效应的各类参量及影响效力, 有望探索出适于推广应用的非线性复杂模型。另一方面, 可充分挖掘已有不同尺度区域地球化学调查数据的价值, 找寻相似理化背景条件区域, 结合相近时段高光谱数据, 按元素分析其与土壤光谱或特定植物冠层光谱的对应关系, 构建相应模型并加以验证, 持续优化形成可推广模型。

## 4 结 论

本文总结了土壤中元素定量反演常见三种方法的主要原理和优点, 并梳理了生态地球化学领域有关土壤-植物间元素迁移富集规律的研究进展, 在此基础上展望了相关领域未来发展方向。文章的主要结论如下:

(1) 土壤元素定量反演的三类常见技术方法, 即土壤元素的直接定量反演、利用土壤中元素相关性的间接定量反演和基于植物光谱的土壤元素定量反演。三类方法当前均需要实验室测试的土壤元素含量作为训练样本, 难于大范围推广应用。

(2) 鉴于植物对土壤中某些元素含量的微小变化响应较为敏感, 相比而言, 利用植物叶片或冠层的光谱间接反演土壤元素含量的方法可信度更高。元素在土壤-植物系统间的迁移富集规律有迹可循, 但又具有复杂性, 不同作物的不同生育期、不同器官/部位, 转运和吸收不同微量元素的特征是存在差异的。利用生态地球化学领域的研究成果, 有助于找到目标元素在不同植物中特有的光谱学效应信息, 解码基于植物光谱的土壤元素定量反演



原理。

(3)推进学科交叉融合,深化大数据挖掘和土壤理化性质的研究,是突破土壤元素广域监测技术瓶颈的有利发展方向。

**致谢:**感谢项目组成员的大力支持。同时衷心感谢审稿专家和编辑对本文提出的宝贵修改意见。

## References

- Ali W, Mao K, Zhang H, Junaid M, Xu N, Rasool A, Feng X B, Yang Z G. 2020. Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 397: 122720.
- Allbed A, Kumar L. 2013. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: A review[J]. *Advances in Remote Sensing*, 2(4): 373-385.
- Bouaziz M, Matschullat J, Gloaguen R. 2011. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil[J]. *Comptes Rendus - Géoscience*, 343(11/12): 795-803.
- Carra J B, Fabris M, Dieckow J, Brito O R, Vendrame P R S, Macedo D S T L. 2019. Near-infrared spectroscopy coupled with chemometrics tools: A rapid and non-destructive alternative on soil evaluation[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(4): 421-434.
- Chen Xingfu. 1994. Symptoms of plant nutrient deficiency[J]. *Anhui Forestry*, (6): 28(in Chinese).
- Cheng Yongsheng, Zhou Yao. 2021. Research progress and trend of quantitative monitoring of hyperspectral remote sensing for heavy metals in soil[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 31(11): 3450-3467 (in Chinese with English abstract).
- Confalonieri M, Fornasier F, Ursino A, Boccardi F, Pintus B, Odoardi M. 2001. The potential of near infrared reflectance spectroscopy as a tool for the chemical characterisation of agricultural soils[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9(1): 1385-1388.
- Cong Yingxin. 2019. Analysis of the harm of excessive trace elements on crops in the Western Liaoning Region[J]. *Modern Rural Science and Technology*, (2): 31(in Chinese).
- Ding Qihong, Tang Tao, Wang Lingguang, Chen Shuwang, Xing Dehe. 2021. Geochemical study on selenium in rock-soil-plant in northern Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 30(5): 570-576,636 (in Chinese with English abstract).
- Feng Minling, Li Shengan, Liu Mingyang, Ye Shaomei, Xiao Dongmei, Mo Xuehui. 2022. Study on the determination of residual distribution of multiple metal elements in rice[J]. *Agriculture and Technology*, 42(1): 24-27 (in Chinese).
- Fu P J, Yang K M, Meng F, Zhang W, Cui Y, Feng F S, Yao G B. 2022. A new three-band spectral and metal element index for estimating soil arsenic content around the mining area[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 157: 27-36.
- Garajeh M K, Malakyar F, Weng Q, Feizizadeh B, Lake T. 2021. An automated deep learning convolutional neural network algorithm applied for soil salinity distribution mapping in Lake Urmia, Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 778: 146253.
- Gholizadeh A, Saberioon M, Ben-Dor E, Boruvka L. 2018. Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(3): 243-278.
- Gu Zhoulei, Xu Xiaohui, An Haibo. 2021. Study on the enrichment of nickel, copper, and zinc elements in soil by corn crops[J]. *Agriculture and Technology*, 41(23): 19-22 (in Chinese).
- Guo Xuefei, Cao Ying, Jiao Runcheng, Nan Yun. 2020. Overview of hyperspectral remote sensing monitoring method of soil heavy metals[J]. *Urban Geology*, 15(3): 320-326 (in Chinese with English abstract).
- Hong Tao, Kong Xiangsheng, Yue Xiangfei. 2022. Translocation and accumulation of selenium and heavy metals in paddy soil-rice plant system in Danzhai County, Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 50(1): 58-65 (in Chinese with English abstract).
- Hunt G R. 1979. Near-infrared (1.3-2.4 mm) spectra of alteration minerals - potential for use in remote sensing[J]. *Geophysics*, 44(12): 1974-1986.
- Ji W J, Shi Z, Huang J Y, Li S. 2014. In situ measurement of some soil properties in paddy soil using visible and near-infrared spectroscopy[J]. *Plos One*, 9(8): e105708.
- Jiang Zonghao. 2020. Effect of Different Selenium Contents in the Soil on Yield-related Traits and Selenium Uptake of Wheat[D]. Xi'an: College of Agronomy Northwest A&F University, 1-54 (in Chinese with English abstract).
- Khanam R, Kumar A, Nayak A, Shahid M, Tripathi R, Vijayakumar S, Bhaduri D, Kumar U, Mohanty S, Panneerselvam P, Chatterjee D, Satapathy B, Pathak H. 2020. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health[J]. *Science of the Total Environment*, 699: 134330.
- Khosravi V, Ardejani F D, Yousefi S, Aryafar A. 2018. Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods[J]. *Geoderma*, 318: 29-41.
- Lai Shuya, Dong Qiuyao, Song Chao, Yang Zhenjing, Yan Mingjiang. 2023. Distribution characteristics and health risk assessment of vanadium and cobalt in surface soil of the Tongbai-Biyang Area, Henan Province[J]. *Geology in China*, 50(1): 222-236 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changbing, Li Weinong, Sun Linlin. 2022. The mechanism and countermeasures of sugar beet deficiency in Xinjiang[J]. *New Agriculture*, (6): 37-38 (in Chinese).
- Liu Yanping, Luo Qing, Cheng Hefa. 2020. Application and development of hyperspectral remote sensing technology to

- determine the heavy metal content in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(12): 2699–2709 (in Chinese with English abstract).
- Luo Junli, Liu Hongjun, Wang Li. 1998. The relationship between plant diseases and nutrient deficiency[J]. *Henan Agriculture*, (11): 15(in Chinese).
- Mei Zhong, Wang Zhixue, Mei Sha, Jiang Zhoulei, Mei Shufang, Shu Xiaoli, Wu Dianxing. 2016. Study on rice high in zinc content[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 30(8): 1515–1523 (in Chinese with English abstract).
- Mirzaei M, Verrelst J, Marofi S, Abbasi M, Azadi H. 2019. Eco-friendly estimation of heavy metal contents in grapevine foliage using in-field hyperspectral data and multivariate analysis[J]. *Remote Sensing*, 11(23): 2731.
- Moros J, Vallejuelo S F D, Gredilla A, Diego D A, Madariaga J M, Garrigues S, Guardia M D L. 2009. Use of reflectance infrared spectroscopy for monitoring the metal content of the estuarine sediments of the Nerbioi-Ibaizabal River (Metropolitan Bilbao, Bay of Biscay, Basque Country)[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(24): 9314–9320.
- Ouyang Yuan, Liu Hong, Li Guangming, Ma Dongfang, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Liu Xiao, Zhao Yinbing, LiFu. 2023. Mineral search prediction based on Random Forest algorithm—A case study on porphyry-epithermal copper polymetallic deposits in the western Gangdise metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 50(2): 303–330 (in Chinese with English abstract).
- Qiao B Y, He X K, Liu Y J, Zhang H, Zhang L T, Liu L M, Reineke A, Liu W X, Müller J. 2022. Maize characteristics estimation and classification by spectral data under two soil phosphorus levels[J]. *Remote Sensing*, 14(3): 493.
- Qu Y H, Jiao S H, Liu S H, Zhu Y Q. 2015. Retrieval of copper pollution information from hyperspectral satellite data in a vegetation cover mining area[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 35(11): 3176–3181.
- Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, Islam M, Tasmien A. 2007. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 67(6): 1072–1079.
- Shen Q, Xia K, Zhang S, Kong C, Hu Q, Yang S. 2019. Hyperspectral indirect inversion of heavy-metal copper in reclaimed soil of iron ore area[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 222: 117191.
- Shi T Z, Liu H Z, Chen Y Y, Wang J J, Wu G F. 2016. Estimation of arsenic in agricultural soils using hyperspectral vegetation indices of rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 308: 243–252.
- Sun Guifang, Yang Guangsui. 2002. Research progress on zinc in soil plant system[J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 8(2): 22–30 (in Chinese).
- Tong Qingxi, Zhang Bing, Zhang Lifu. 2016. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 689–707 (in Chinese with English abstract).
- Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. 2006. *Hyperspectral Remote Sensing—Principles, Techniques and Applications*[M]. Beijing: Higher Education Press, 18–25(in Chinese).
- Tu Yexin, Fei Teng. 2016. From vegetation hyperspectral remote sensing to the diagnosis of soil heavy metal pollution[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 55(6): 1361–1368 (in Chinese with English abstract).
- Wang C, Feng M C, Yang W D, Ding G W, Wang H Q, Li Z H, Sun H, Shi C C. 2016. Use of spectral character to evaluate soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 80(4): 1078–1088.
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Yang Junquan. 2019. Evaluation of the characteristic land resources with Zn, Se and their ecological effects in Raoyang county of Hebei province[J]. *Geological Survey and Research*, 42(1): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengchen, Tian Wen, Xiang Ping, Xu Wumei, Guan Dongxing, Ma Qiying. 2022. Mechanism of heavy metal uptake and transport in soil-rice/wheat system and regulation measures for safe production[J]. *China Environmental Science*, 42(2): 794–807 (in Chinese with English abstract).
- Wang Daming, Qin Kai, Li Zhizhong, Zhao Yingjun, Chen Weitao, Gan Yiqun. 2018. Retrieval of organic matter content in black soil based on airborne hyperspectral remote sensing data: Taking Jiansanjiaoguo District in Heilongjiang Province as an example[J]. *Earth Science*, 43(6): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhua, Li Yang, Liang Shuneng, Sun Xiaofei. 2022. The study of land desertification recognition and extraction based on hyperspectral satellite data[J]. *North China Geology*, 45(4): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhua, Zuo Ling, Li Zhizhong, Mu Huayi, Zhou Ping, Yang Jijia, Zhao Yingjun, Qin Kai. 2021. A detection method of trace metal elements in black soil based on hyperspectral technology: Geological implications[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 418–429 (in Chinese with English abstract).
- Wei L F, Yuan Z R, Wang Z X, Zhao L Y, Zhang Y X, Lu X Y, Cao L Q. 2020. Hyperspectral inversion of soil organic matter content based on a combined spectral index model[J]. *Sensors*, 20(10): 2777.
- Xi Xiaohuan. 2004. Eco-geochemical research and eco-geochemical evaluation[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 28(1): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xiaohuan. 2005. Multi-purpose regional geochemical survey and ecogeochemistry: New direction of Quaternary research and application[J]. *Quaternary Sciences*, 25(3): 269–274 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Hailong, Ma Yuan, Zhou Huicheng, Zhang Chengjun, Yao Yujiao, Chen Jianguang, Zhang Degang. 2022. Characteristics of soil

- trace elements and vegetation and their relationships in degraded alpine steppe in Sanjiangyuan region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 30(8): 1925–1933 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lingyu, Gao Xiaohong, Zhang Wei, Shi Feifei, He Linhua, Jia Wei. 2016. Estimating heavy metal concentrations in topsoil from vegetation reflectance spectra of hyperion images: A case study of Yushu County, Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(6): 1775–1784 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongfang, Xi Xiaohuan, Cheng Hangxin, Zhou Guohua, Chen Deyou, Zhang Jianxin, Yuan Xiaojun, Fen Haiyan, Chen Jiawei, Liu Aihua, Tang Qifeng, Yu Tao. 2005. The core and counter measures of regional ecological geochemical assessment[J]. *Quaternary Sciences*, 25(3): 275–284 (in Chinese with English abstract).
- Yu H, Kong B, Wang G X, Du R X, Qie G P. 2018. Prediction of soil properties using a hyperspectral remote sensing method[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4): 546–559.
- Zeng Huizhen, Xu Qingsheng, Xu Jiansheng, Liu Bangzhen, Gao Huayan, Wang Xinhua. 2013. Identification and correction of plant deficiency disorders[J]. *Modern Horticulture*, (17): 59(in Chinese).
- Zhang Chengming, Zhou Xinbin, Gao Axiang. 2017. Uptake and accumulation of selenium and iron coating rice root at different growth stages[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 54(3): 693–702 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dong, Li Yongchun, Su Rilige, Yuan Guoli, Tai Surigala, Wang Yongliang, Chen Guodong, Zhou Wenhui, Du Yuchunzi, Yang Jianyu. 2023. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Wuyuan County, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 51(1): 248–263 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Donghui, Zhao Yingjun, Zhao Ningbo, Qin Kai, Pei Chengkai, Yang Yuechao. 2019. A new indirect extraction method for selenium content in black soil from hyperspectral data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(7): 2237–2243 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiandong, Wang Li, He Litao, Liu Xuejun, Liu Limin, Luo Kunli. 2022. Distribution characteristics of selenium in rocks, soils and agricultural products of Langa[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 53(1): 195–203 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingjing, Zhou Weihong, Zhou Mengmeng, Liu Ying, Du Xiaolong, Li Jianlong. 2018. Research status, principles and prospects of hyperspectral remote sensing monitoring of heavy metal pollution in large-scale soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(12): 9–13 (in Chinese).
- Zhang Liangpei, He Jiang, Yang Qianqian, Xiao Yi, Yuan Qiangqiang. 2022. Data-driven multi-source remote sensing data fusion: progress and challenges[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1317–1337 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lixia, Peng Jianming, Ma Jie. 2010. Study progress on nutrient deficiency of plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(8): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lizhou, Wand Dianwu, Zhang Yuming, Cheng Yisong, Li Hongjun, Hu Chunsheng. 2010. Diagnosis of N nutrient status of corn using digital image processing technique[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18(6): 1340–1344 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weili, Kolbe H, Zhang Renlian, Zhang Dingxiang, Bai Zhanguo, Zhang Jing, Shi Huading. 2022. Overview of soil survey works in main countries of world[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 55(18): 3565–3583 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinna, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2023. Review on heavy metal pollution and remediation technology in the soil of mining areas[J]. *Geology in China*, 50(1): 84–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua, Zeng Daoming, He Ling, Zhu Xiaoting, Sun Binbin, Bai Jinfeng, Zhou Ziyi. 2015. Eco-geochemical characteristics of the Tieguanyin Tea Gardens in Fujian Province[J]. *Geology in China*, 42(6): 2008–2018 (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).

## 附中文参考文献

- 陈兴福. 1994. 植物缺素症状[J]. *安徽林业*, (6): 28.
- 成永生, 周瑶. 2021. 土壤重金属高光谱遥感定量监测研究进展与趋势[J]. *中国有色金属学报*, 31(11): 3450–3467.
- 丛迎新. 2019. 辽西地区微量元素过量对农作物的危害分析[J]. *现代农村科技*, (2): 31.
- 丁秋红, 唐韬, 王龄广, 陈树旺, 邢德和. 2021. 辽宁北部地区岩石-土壤-植物中硒元素地球化学研究[J]. *地质与资源*, 30(5): 570–576, 636.
- 冯敏铃, 李盛安, 刘铭扬, 叶少媚, 肖冬梅, 莫学辉. 2022. 测定水稻中多种金属元素残留分布的研究[J]. *农业与技术*, 42(1): 24–27.
- 谷周雷, 许晓慧, 安海波. 2021. 玉米作物对土壤中镉铜锌元素富集情况的研究[J]. *农业与技术*, 41(23): 19–22.
- 郭学飞, 曹颖, 焦润成, 南赞. 2020. 土壤重金属污染高光谱遥感监测方法综述[J]. *城市地质*, 15(3): 320–326.
- 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 2022. 贵州丹寨县土壤-水稻中硒和重金属的积累及迁移特征[J]. *地球与环境*, 50(1): 58–65.
- 姜宗昊. 2020. 土壤中不同硒含量对小麦产量相关性状和硒吸收利用的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学, 1–54.
- 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 振京, 严明疆. 2023. 河南省桐柏-泌阳地区表层土壤钒和钴的分布特征及健康风险评估[J]. *中国地质*, 50(1): 222–236.
- 刘长兵, 李蔚农, 孙琳琳. 2022. 新疆甜菜缺素症发生机理及应对措施[J]. *新农业*, (6): 37–38.
- 刘彦平, 罗晴, 程和发. 2020. 高光谱遥感技术在土壤重金属含量测定领域的应用与发展[J]. *农业环境科学学报*, 39(12): 2699–2709.
- 罗俊丽, 刘红君, 王力. 1998. 植物病害与缺素的关系[J]. *河南农业*, (11): 15.
- 梅忠, 王治学, 梅沙, 蒋宙蕾, 梅淑芳, 舒小丽, 吴殿星. 2016. 高锌水

- 稻研究进展[J]. *核农学报*, 30(8): 1515-1523.
- 欧阳渊, 刘洪, 李光明, 马东方, 张林奎, 黄瀚霄, 张景华, 张腾蛟, 柳潇, 赵银兵, 李富. 2023. 基于随机森林算法的找矿预测——以冈底斯成矿带西段斑岩—浅成低温热液型铜多金属矿为例[J]. *中国地质*, 50(2): 303-330.
- 屈永华, 焦思红, 刘素红, 朱叶青. 2015. 从高光谱卫星数据中提取植被覆盖区铜污染信息[J]. *光谱学与光谱分析*, 35(11): 3176-3181.
- 孙桂芳, 杨光穗. 2002. 土壤-植物系统中锌的研究进展[J]. *华南热带农业大学学报*, 8(2): 22-30.
- 童庆禧, 张兵, 张立福. 2016. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. *遥感学报*, 20(5): 689-707.
- 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 2006. 高光谱遥感-原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 18-25.
- 涂晔昕, 费腾. 2016. 从植被高光谱遥感到土壤重金属污染诊断的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 55(6): 1361-1368.
- 汪大明, 秦凯, 李志忠, 赵英俊, 陈伟涛, 甘义群. 2018. 基于航空高光谱遥感数据的黑土地有机质含量反演: 以黑龙江省三江地区为例[J]. *地球科学*, 43(6): 1-19.
- 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 邢怡, 杨俊泉. 2019. 河北省饶阳县富锌、硒特色土地及其生态效应评价[J]. *地质调查与研究*, 42(1): 49-56.
- 王成尘, 田稳, 向萍, 徐武美, 管冬兴, 马奇英. 2022. 土壤-水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控[J]. *中国环境科学*, 42(2): 794-807.
- 王建华, 李阳, 梁树能, 孙小飞. 2022. 基于高光谱卫星数据的土地沙化识别及提取研究[J]. *华北地质*, 45(4): 60-67.
- 王建华, 左玲, 李志忠, 穆华一, 周萍, 杨佳佳, 赵英俊, 秦凯. 2021. 基于高光谱技术的黑土地微量金属元素探测方法及地学意义[J]. *地质力学学报*, 27(3): 418-429.
- 奚小环. 2004. 生态地球化学与生态地球化学评价[J]. *物探与化探*, 28(1): 10-15.
- 奚小环. 2005. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学——第四纪研究与应用的新方向[J]. *第四纪研究*, 25(3): 269-274.
- 肖海龙, 马源, 周会程, 张成君, 姚玉娇, 陈建纲, 张德罡. 2022. 三江源退化高寒草原土壤微量元素与植被特征及其关系[J]. *草地学报*, 30(8): 1925-1933.
- 杨灵玉, 高小红, 张威, 史飞飞, 何林华, 贾伟. 2016. 基于 Hyperion 影像植被光谱的土壤重金属含量空间分布反演——以青海省玉树县为例[J]. *应用生态学报*, 27(6): 1775-1784.
- 杨忠芳, 奚小环, 成杭新, 周国华, 陈德友, 张建新, 袁晓军, 冯海艳, 陈家玮, 刘爱华, 汤奇峰, 余涛. 2005. 区域生态地球化学评价核心与对策[J]. *第四纪研究*, 25(3): 275-284.
- 曾慧珍, 许庆胜, 徐建生, 刘邦贞, 高华岩, 王信华. 2013. 植物缺素症的识别及矫正[J]. *现代园艺*, (17): 59.
- 张城铭, 周鑫斌, 高阿祥. 2017. 水稻不同生育期对硒吸收累积及铁膜的吸附特性[J]. *土壤学报*, 54(3): 693-702.
- 张栋, 李永春, 苏日力格, 袁国礼, 邵苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 周文辉, 杜雨春子, 杨建雨. 2023. 内蒙古五原县某地土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 51(1): 248-263.
- 张东辉, 赵英俊, 赵宁博, 秦凯, 裴承凯, 杨越超. 2019. 一种间接从高光谱数据中提取黑土硒含量的新方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 39(7): 2237-2243.
- 张建东, 王丽, 赫栗涛, 刘学军, 刘利民, 雒尼利. 2022. 岚皋县岩石、土壤和农产品中硒分布规律研究[J]. *土壤通报*, 53(1): 195-203.
- 张静静, 周卫红, 邹萌萌, 刘影, 杜小龙, 李建龙. 2018. 高光谱遥感监测大面积土壤重金属污染的研究现状、原理及展望[J]. *江苏农业科学*, 46(12): 9-13.
- 张丽霞, 彭建明, 马洁. 2010. 植物营养缺素研究进展[J]. *中国农学通报*, 26(8): 157-163.
- 张良培, 何江, 杨倩倩, 肖屹, 袁强强. 2022. 数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J]. *测绘学报*, 51(7): 1317-1337.
- 张立周, 王殿武, 张玉铭, 程一松, 李红军, 胡春胜. 2010. 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用[J]. *中国生态农业学报*, 18(6): 1340-1344.
- 张维理, Kolbe H, 张认连, 张定祥, 白占国, 张晶, 师华定. 2022. 世界主要国家土壤调查工作回顾[J]. *中国农业科学*, 55(18): 3565-3583.
- 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 2023. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. *中国地质*, 50(1): 84-101.
- 周国华, 曾道明, 贺灵, 朱晓婷, 孙彬彬, 白金峰, 周子琦. 2015. 福建铁观音茶园生态地球化学特征[J]. *中国地质*, 42(6): 2008-2018.
- 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.