

doi: 10.11720/wtyht.2023.1201

多吉卫色,次仁旺堆,尼玛洛卓,等. 西藏白朗县农田系统硒含量特征及影响因素[J]. 物探与化探,2023,47(4):1118-1126. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1201>

D J W S, C R W D, N M L Z, et al. Characteristics and influencing factors of Se content in the farmland system in Bailang County, Tibet, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 1118-1126. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1201>

西藏白朗县农田系统硒含量特征及影响因素

多吉卫色,次仁旺堆,尼玛洛卓,周鹏,尼玛次仁

(西藏自治区地质矿产勘查开发局 地热地质大队, 西藏 拉萨 850032)

摘要: 富硒土地开发在全国各地区普遍开展并取得显著成果,然而西藏地区目前尚无报道有关富硒的土地或作物。本文以西藏白朗县重点耕地地区为研究对象,讨论土壤、作物中的硒含量特征及影响因素,支撑服务西藏高原地区的富硒土地开发及利用。结果表明,研究区土壤 Se 含量范围为 $(0.05 \sim 0.76) \times 10^{-6}$,高于西藏土壤背景值 0.15×10^{-6} ;研究区 76.83% 土地面积为足硒,根据碱性土壤 Se 标准阈值 ($w(\text{Se}) \geq 0.3 \times 10^{-6}$) 划定,Se 含量高于 0.3×10^{-6} 的土地面积 45.43 km^2 。进一步研究显示,富硒土壤分布区域青稞籽粒中 Se 含量范围为 $(0.017 \sim 0.17) \times 10^{-6}$,平均含量为 0.063×10^{-6} ,油菜籽籽粒中 Se 含量范围为 $(0.043 \sim 0.14) \times 10^{-6}$,平均含量为 0.078×10^{-6} 。富硒土壤区域根系土结果表明,涅如组地层控制着土壤中 Se 的来源,土壤 Se 和有效 Se 含量与 N、P、碱解氮、速效磷等具有显著的正相关,而与 pH 呈显著负相关,说明土壤中的大量养分元素及 pH 值对 Se 的行为具有重要影响作用。综上,白朗县富硒土壤分布区域土壤环境质量良好,农作物中硒的含量较高,具有较好的发展高原富硒农产品的潜力。

关键词: 土壤 Se 含量;青稞;影响因素;西藏

中图分类号: X142;X825

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)04-1118-09

0 引言

硒是人体和动物必需的微量元素之一,一旦缺乏和过量都会引起各种疾病^[1-2]。土壤中的硒与人体健康和动物生长关系密切,土壤中硒通过食物链进入人体可引起明显的效应。农田生态系统中土壤硒含量特征、分布及影响因素等一直是研究热点。中国是全球 40 个缺硒国家之一,从东北至西南地区存在一条低硒带,土壤中硒含量不足 0.125×10^{-6} ^[3],而西藏整体上也位于该低硒地带上。因此,西藏部分地区因硒长期摄入量不足而缺硒现象非常普遍,这也是导致大骨节病等高发的重要原因之一^[4-6]。西藏地广人稀,自然条件差,地质背景复杂,工作研究程度低,导致对西藏地区的土壤及农作物硒含量状况等研究资料非常有限。最具代表性的研究成果为张晓平等^[7]在西藏地区采集的 14 个土壤类型的 205 件表层土壤样品,得出结论为西藏土

壤硒含量算数平均值为 0.15×10^{-6} ,95% 的硒含量范围在 $(0.049 \sim 0.365) \times 10^{-6}$,中位数值为 0.135×10^{-6} ,说明西藏表层土壤中硒的平均含量不足中国硒元素背景值的一半。李顺江等^[5]通过对西藏大骨节病与非病区土壤、粮食、儿童发硒进行研究,结果显示,西藏儿童发硒含量低,特别是大骨节病病区儿童的发硒含量更低,认为土壤缺硒是导致大骨节病发病的一个主要原因。曲航等^[8-9]对西藏土壤硒状况及富硒青稞生产途径进行探讨,并在西藏青稞主产区采集 80 件表层土壤样品和 67 件青稞籽粒样品,结果显示,土壤硒平均值为 0.18×10^{-6} ,青稞籽粒硒平均值为 0.011×10^{-6} 。可以看出,西藏大部分地区处于低硒水平,但西藏拥有复杂多样的成土母质和成土过程,仅用少量样点来评价整个西藏土壤和农作物中的硒含量状况,必然会影响最终结论。

西藏白朗县是西藏自治区商品粮油基地之一,也是国家级蔬菜标准化种植示范区和中国特色农产品优势区等,享有“西藏粮仓”和“高原果蔬之乡”的

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-12-13

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160313-22); 西藏自治区科技计划项目 (XZ202001ZY0042N)

第一作者: 多吉卫色 (1983-), 男, 工程师, 主要从事土地质量地球化学调查工作。Email: 549229277@qq.com

美誉,在西藏自治区发展中具有十分重要的地位。本文基于西藏白朗县重点耕地区 1:5 万土地质量地球化学调查的数据基础,按照《天然富硒土地划定与标识》(DZ/T 0380—2021)要求,重新划定富硒土地,在富硒土壤区域系统采集农作物、根系土壤及形态分析等样品,经样品分析统计,讨论研究区土壤及农作物中硒含量特征及主要影响因素,以期为西藏富硒土地资源开发利用、发展高原特色富硒产业等提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于西藏自治区日喀则市白朗县,地貌属于藏南山原湖盆谷地区,地势相对平坦,河谷宽阔,土质肥沃。区内为高原温带半干旱季风气候区,夏季温暖湿润,冬季干冷,日照充足,太阳辐射强烈,无霜期短,适合青稞、油菜等作物生长。研究区地层属于喜马拉雅地层分区,区内广泛出露三叠系和侏罗系地层,其中三叠系普遍浅变质,为浅海或深水盆地相细屑岩,而侏罗系总体显示了浅水海盆的沉积。

土壤类型以潮土和山地灌丛草原土为主。土地利用方式主要为水浇地、旱地、天然牧草地和灌木林地等。

2 研究方法

2.1 样品采集

白朗县 2018 年开展了 1:5 万土地质量地球化学调查,面积 207 km²(见图 1),采集表层土壤样品 1 853 件,平均采样密度 9 点/km²;2020~2021 年在富硒土壤区域采集农作物及配套根系土壤样品 30 件,其中青稞籽粒样品 21 件、油菜籽籽粒样品 6 件、燕麦籽粒样品 3 件,采集植物全株样 4 件,形态分析样 6 件。表层土壤及根系土壤样品采集以大田中央为中心,向四周辐射 20~50 m 范围确定 4~6 个分样点,每个分样点采样部位、深度、质量、采样方法等均保持一致,最后分样等量组合成 1 件混合样品。样品初步加工在野外驻地完成,确保样品晾干和加工场地无污染,将样品在样品架上自然风干并适时翻动、用木棒敲碎,剔除杂物。土样要全部通过 2 mm

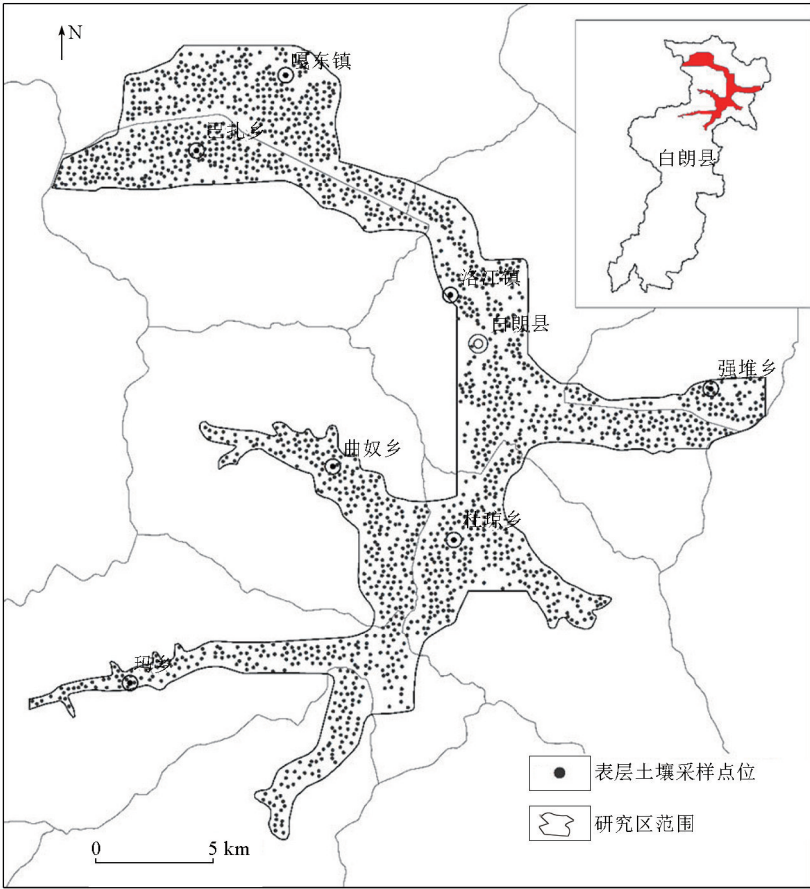


图 1 研究区工作范围及采样点位

Fig. 1 Bitmap of the working range and sampling points in the study area

的孔径筛,未过筛的土粒必须重新碾压过筛,直至全部样品通过 2 mm 孔径的尼龙筛为止。过筛后土壤样品称量后混匀,取质量 120 g 用纸袋盛装及时送样分析。农作物样品选择在无风晴天的时候采集,在成熟农作物的大块田地,以 1 000~2 000 m² 为采样单元,选取 50~60 颗青稞、油菜、燕麦类采取青稞穗、燕麦穗、油菜角果等混合成一件样品,全株样品采集后,立即将根、秸秆和籽实分开,以免养分转移。本次土壤及农作物的样品采集及加工严格按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)及《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)规范要求执行^[10-11]。本项目已通过专家组野外验收,野外工作质量可靠。

2.2 分析测试

为了减少误差,本次采集的所有样品分析测试工作均由湖北省地质实验测试中心(自然资源部武汉矿产资源监督检测中心)完成,严格按照中国地质调查局地质调查技术标准《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)、《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)、《生态地球化学评价样品分析技术要求》等要求。表层土壤和根系土壤样品采用原子荧光光谱法(AFS)测定 Se,配套方案检出限为 0.01×10⁻⁶;采用容量法(VOC)测量有机质和碱解氮,配套方案检出限分别为 0.034×10⁻⁶ 和 1×10⁻⁶;采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)测定磷和速效磷,配套方案检出限分别为 4.3×10⁻⁶ 和 0.2×10⁻⁶;采用元素分析仪法(EA)测定 N,配套方案检出限为 15×10⁻⁶;采用容量法(VOL)测定碱解氮,配套方案检出限为 1×10⁻⁶;催化分光光度法(COL)测定有效硫,配套方案检出限为 0.05×10⁻⁶;采用离子选择性电极法(ISE)测定 pH 值,配套方案检出限为 0.1。有效硒分析方法检出限为 0.000 5×10⁻⁶,测定方法为:称取 10.0 g 样品于 50 mL 烧杯中,加入 20 mL 沸水,摇匀后,置于 160 ℃ 电热板上加热,10 min 后取下,冷却后过滤,取 5 mL 滤液于聚四氟乙烯烧杯中,加 HNO₃、H₂O₂,于 100 ℃ 电热板蒸至小体积后,加(1+1)盐酸后加热还原,转移至比色管中,AFS 测定有效硒。采用氢化物发生原子荧光光谱法测定各相态

中的 Se。

本次表层土壤样品分析过程中共插入 12 个国家一级标准物质对分析测试结果的准确度、精确度、报出率等进行内部质量监控,结果显示样品的准确度和精密度及报出率均符合规范要求,总合格率 100%,符合规范要求;各项质量指标均优于规范的要求。农作物样品分析采用原子荧光光谱法(AFS)测定 Se,检出限为 0.005×10⁻⁶。最终的分析测试结果由验收专家组进行验收并通过验收,样品分析数据质量可靠。

2.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 22 和 Microsoft Excel365 等软件完成数据相关统计分析;评价图件采用中国地质调查局发展研究中心开发的“土地质量地球化学调查与评价数据管理与维护(应用)子系统”软件完成绘制。

3 结果与讨论

3.1 土壤 Se 含量特征

3.1.1 研究区土壤 Se 含量特征

研究区表层土壤 Se 含量范围为(0.05~0.76)×10⁻⁶,平均含量为(0.24±0.08)×10⁻⁶,明显高于西藏土壤 Se 平均值^[7],而低于中国表层土壤(0~20 cm)Se 背景值^[12-13],变异系数 32%,表明研究区表层土壤中 Se 分布不均匀(表 1)。根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中硒等级划定标准,研究区土壤 Se 以适量为主,适量土壤面积占研究区总面积的 76.83%,Se 缺乏和边缘土壤面积占研究区总面积的 21.91%,Se 高含量土壤面积仅占研究区总面积的 1.26%。根据《天然富硒土地划定与标识》(DZ/T 0380—2021)标准,以碱性土壤 Se 标准阈值($w(\text{Se})\geq 0.3\times 10^{-6}$)对研究区进行富硒土地划定,结果表明白朗县研究区富硒土地面积有 45.43 km²,富硒耕地资源面积 27.58 km²。结合研究区重金属元素污染风险程度,无污染风险和污染风险可控的富硒土地面积分别为 29.74 km²、15.69 km²,无污染风险和污染风险可控的富硒耕地面积分别为 19.43 km²、8.15 km²。此次发现的富硒土壤

表 1 研究区表层土壤硒含量统计

Table 1 Selenium contents of surface soils in the study area

指标	样品数	最小值/10 ⁻⁶	最大值/10 ⁻⁶	算术均值/10 ⁻⁶	中位数/10 ⁻⁶	算术标准差/10 ⁻⁶	变异系数
表层土壤 Se	1853	0.05	0.76	0.24	0.24	0.08	0.32
根系土壤 Se	30	0.23	0.69	0.35	0.33	0.08	0.24
西藏土壤 Se ^[7]	205	0.04	0.37	0.15	0.14		0.48
中国表层土壤 Se ^[12-13]	376743	0	49.60	0.26	0.21	0.22	0.80

分布在研究区中南部曲奴乡和杜琼乡等地,且集中连片分布,具有较好的富硒土地资源开发利用前景(见图 2)。

3.1.2 富硒区根系土壤 Se 含量特征

富硒土壤区域采集的根系土壤分析结果(表 1)

显示,土壤 Se 含量范围为 $(0.23\sim0.69)\times10^{-6}$,中位数为 0.33×10^{-6} ,平均值为 0.35×10^{-6} ,明显高于西藏和中国表层土壤 Se 背景值;有效硒含量范围为 $(3.48\sim33.17)\times10^{-9}$,平均含量为 9.74×10^{-9} ,占总硒含量的 1.03%~4.81%。

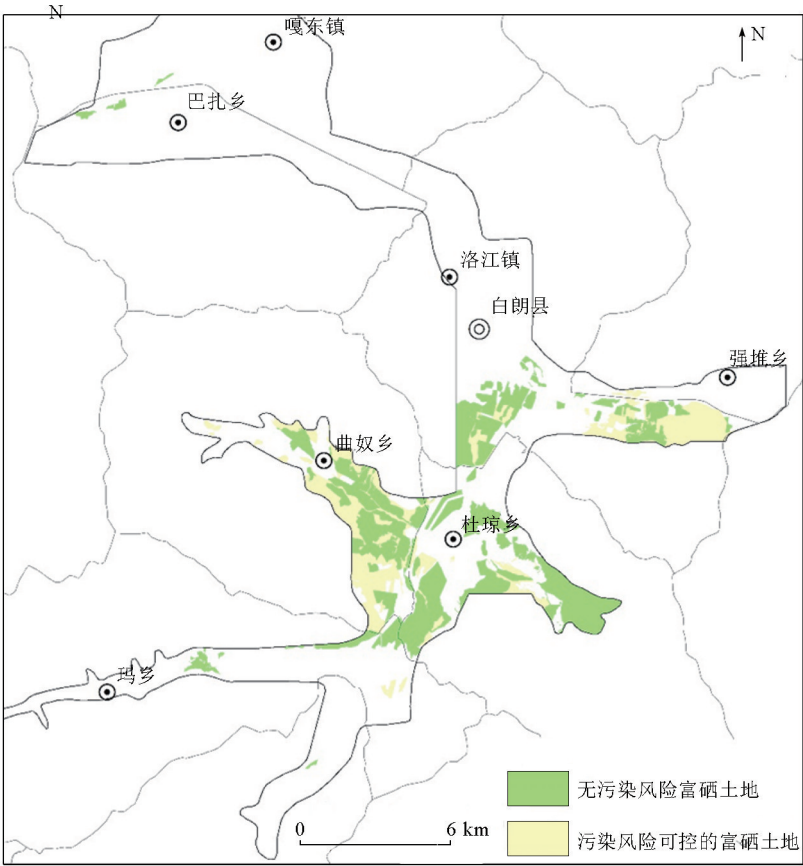


图 2 研究区表层土壤富硒土壤分布

Fig. 2 Distribution map of selenium-rich soil in the surface soil of the study area

3.2 作物籽粒 Se 含量特征

通过土壤—粮食—人(动物)方式获取适量硒营养是一条安全、有效的途径。青稞作为西藏居民主要粮食而广泛种植,因此,农作物主要采集青稞、油菜及燕麦样品。结果表明,富硒土壤区域青稞籽粒中 Se 含量范围为 $(0.017\sim0.17)\times10^{-6}$,平均含量为 0.063×10^{-6} 。鉴于目前尚无相关的富硒青稞地方标准,本次参照国家标准《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)标准中硒含量应在 $(0.04\sim0.3)\times10^{-6}$ 的要求,青稞籽粒富硒率达 62%;油菜籽籽粒中 Se 含量范围 $(0.043\sim0.14)\times10^{-6}$,平均含量为 0.078×10^{-6} ,参照重庆市地方标准《富硒农产品》(DB50/T 705—2016)中的油菜籽硒含量应在 $(0.02\sim0.3)\times10^{-6}$ 的要求,油菜籽富硒率达 100%;燕麦籽粒中硒含量为 $(0.012\sim0.023)\times10^{-6}$,平均含量为 0.015×10^{-6} 。由于不同农作物对土壤中硒的吸收能

力不尽相同,导致生物富集能力不同。经富硒土壤区域生物富集系数研究发现,油菜籽籽粒富集能力较强,生物富集系数范围在 13.36%~44.35%,富集系数平均值为 25.8%;青稞富集系数范围在 5.08%~55.62%,富集系数平均值为 15.94%;而燕麦籽粒生物富集系数最小,富集系数平均值仅 4.41%。此外,对研究区青稞和油菜籽转运系数研究发现,硒从青稞根系转运到青稞籽实的平均转运系数为 0.59,硒从油菜籽根系转运到油菜籽粒的转运系数为 1.21,表明油菜籽对硒的转运能力较强。青海作为青藏高原的一部分,在青海东部存在大面积的富硒土壤^[14],经两地对比发现,研究区富硒土壤区域主要农作物青稞和油菜籽粒中硒含量高于青海东部青稞和油菜籽粒中的硒含量,表明研究区富硒土壤区域土壤 Se 生物有效性较高,具有良好的富硒农产品开发潜力。

青稞、油菜等的秸秆是当地的主要饲料,对畜牧业生产具有重要意义。青稞等作物秸秆中的硒含量也影响着牲畜体内的硒含量,同时也间接影响着当地居民的硒水平。以往在西藏青稞等饲料作物硒含量调查中发现,饲料中硒含量95%分布在(0~0.05)×10⁻⁶^[15]。目前,硒元素从土壤—根系—秸秆—籽粒的迁移研究甚少,了解硒在青稞植株内的根系吸收、转运和积累,以及制定有效的农业增产措施具有重要意义^[16]。在富硒土壤区域的青稞、油菜、燕麦的根系、秸秆、籽实中硒含量调查发现,青稞根系中硒的平均值为0.092×10⁻⁶,平均富集系数为23.21%,青稞秸秆中硒的平均值为0.068×10⁻⁶,平均富集系数为17.76%,青稞籽粒中硒的平均值为0.052×10⁻⁶,平均富集系数为13.42%;油菜根系中硒的含量值为0.080×10⁻⁶,富集系数为34.06%,油菜秸秆中硒的含量值为0.053×10⁻⁶,富集系数为32.63%,

油菜籽粒中硒的含量为0.023×10⁻⁶,富集系数为41.19%;燕麦根系中硒的含量值为0.08×10⁻⁶,富集系数为22.13%,燕麦秸秆中硒的含量为0.053×10⁻⁶,富集系数为14.85%,燕麦籽粒中的硒含量为0.023×10⁻⁶,富集系数为6.26%。可见,青稞、油菜、燕麦全株样品中硒的含量和富集系数从根系到籽粒逐渐减少,依次为根系>秸秆>籽粒(图3),说明植物根系从土壤中吸收硒,通过秸秆(茎)向上迁移,最后到籽粒中积累,同时植物根系和秸秆中也积累硒,是研究区牲畜的优质饲料。

农作物中重金属元素的超标会直接影响居民健康和富硒农产品的可持续发展,本次在富硒土壤区采集的农作籽粒中,重金属元素含量均低于国家食品安全标准中的污染物限量指标,属于优质富硒农产品种植区域。

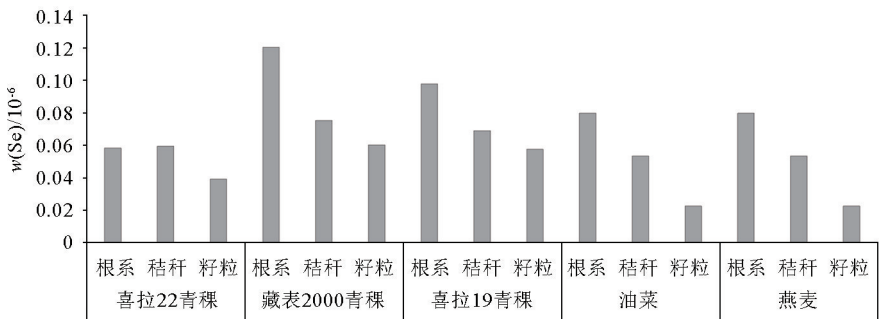


图3 富硒土壤区域植物全株样品中硒含量分布特征

Fig. 3 Distributional property of selenium content in selenium-rich soil area plant

3.3 土壤 Se 含量影响因素

3.3.1 成土母岩因素

成土母质是土壤形成的物质基础,土壤 Se 含量主要受成土母质控制^[17-18]。从表2统计结果可以

表2 不同地质体分布区表层土壤中硒含量特征

Table 2 Characteristics of selenium content in surface soils of different geological bodies distribution areas

地层	算术均值/10 ⁻⁶	中位数/10 ⁻⁶	标准差/10 ⁻⁶	最大值/10 ⁻⁶	最小值/10 ⁻⁶	变异系数
昂仁组 (K ₁₋₂ a)	0.20	0.22	0.03	0.22	0.14	0.17
甲不拉组 (K _{1j})	0.22	0.22	0.01	0.24	0.21	0.06
宗卓组 (K _{2z})	0.20	0.18	0.08	0.44	0.14	0.40
涅如组 (T _{3n})	0.32	0.32	0.07	0.50	0.17	0.20
朗杰学群 (T _{3l})	0.20	0.21	0.04	0.24	0.16	0.19
穷果群 (T _{1-2q})	0.20	0.21	0.03	0.24	0.16	0.15

看出,在涅如组(T_{3n})粉砂质板岩、炭质绢云板岩等成土母岩分布区表层土壤中硒含量最高,平均值达0.32×10⁻⁶,而其他地层分布区土壤中硒含量均较低,说明涅如组地层为研究区的重要土壤 Se 来源,土壤中硒含量明显受该地层分布控制。涅如组地层在藏南地区分布面积较广,特别是在隆子县、浪卡子县、康马县等地大面积分布,为了验证涅如组地层为重要的土壤含硒来源,在隆子县分布面积较广的涅如组地层区采集表层土壤样品455件,经样品分析,硒平均值为0.45×10⁻⁶,也证实了该结论,同时为西藏地区寻找富硒土壤提供了新的方向。

3.3.2 土地利用方式影响

土地利用伴随着植物群落的变化,且强烈影响土壤性质,土壤 Se 在不同土地利用类型间的显著差异可能是由于土地利用改变了土壤理化性质^[19]。研究区不同用地类型中硒的含量有所差异,在天然牧草地分布区土壤中 Se 含量最高,中位数达0.29×10⁻⁶,水浇地分布区土壤中硒含量中位数为0.24×

10^{-6} ,而灌木林地和其他林地等分布区土壤中硒的含量相对较低。这可能是天然牧草地人为干扰较小,部分硒随着牧草凋落物的分解返还到土壤中^[20],而农田生态系统中耕层土壤 Se 以腐殖质化为主,有助于植物吸收形成低硒土壤^[21]。

研究区主要用地类型为耕地、草地和林地。经相关性分析显示,在耕地、草地和林地土壤中硒含量与有机质含量具有一定的相关性,相关系数分别为耕地 0.109($n=1\,477,P<0.01$)、草地 0.203($n=211,P<0.01$)和林地 0.358($n=96,P<0.01$)。总体来看,不同用地类型土壤中硒含量及影响差异较小。

3.3.3 理化性质影响

土壤 Se 成因来源以及 pH、Eh、有机质、铁铝氧化物等土壤理化条件决定了硒赋存形态与生物有效性^[22]。本文理化性质指标选择有机质、pH 值、养分等指标和硒形态对土壤硒的影响进行分析。

1) 土壤 pH。土壤 pH 是控制亚硒酸盐和硒酸盐之间转化的主要因素,酸性和中性的土壤中亚硒酸盐(SeO_3^{2-})普遍存在,而在通气良好的碱性土壤中硒主要以硒酸态(SeO_4^{2-})存在^[23],有利于植物吸收。研究区表层土壤 pH 值范围为 3.28~8.85,平均值为 8.22,土壤整体以碱性土壤为主,碱性土壤面积达 172 km^2 ,占 83%,强碱性土壤面积为 32.44 km^2 ,占 15.62%。对研究区土壤全硒与 pH 值含量进行相关性分析,两者之间并无显著的相关性,这与

杨忠芳等^[24]在海南岛土壤 Se 研究时发现,碱性土壤中 Se 含量不受 pH 控制结果相似。在富硒区域对根系土壤中全硒、有效硒含量与 pH 进行相关性分析,三者指标均具有显著负线性相关,相关系数分别为 $R=-0.542(n=30,P<0.01)$ 、 $R=-0.428(n=30,P<0.05)$,表明土壤中随着 pH 值升高而硒和有效硒含量降低(图 4)。这与其他研究者发现,土壤 Se 与 pH 含量显著呈负相关的结论基本一致^[19,25-26],说明不同 pH 值对土壤 Se 行为和影响作用不一致。

2) 有机质。土壤有机质对硒生物有效性的影响机制,是富硒土地利用规划与耕作管理的重要理论依据^[22]。一般情况下,有机质对硒有强烈的吸附与固定作用^[27]。研究区表层土壤有机质含量普遍较缺乏和缺乏,面积共达 182.61 km^2 ,占总面积的 87.90%。将研究区土壤硒含量与有机质含量进行相关性分析,两者含量之间无显著相关性。在富硒土壤区域根系土壤的有机质与全 Se 含量相关性分析结果表明,两者之间也并无显著相关性,但全 Se 与有效 Se 呈高度线性相关, $R=0.822(n=30,P<0.01)$,而有效硒与有机质也呈线性正相关, $R=0.416(n=30,P<0.05)$ (图 4),说明随着土壤有机质含量增加而提高了土壤中硒的有效性。

3) 其他理化指标。研究区富硒土壤区域根系土壤中 Se 和有效硒与 P、N、速效磷、碱解氮指标也具有较好正相关性(表 3),说明在富硒土壤区域土

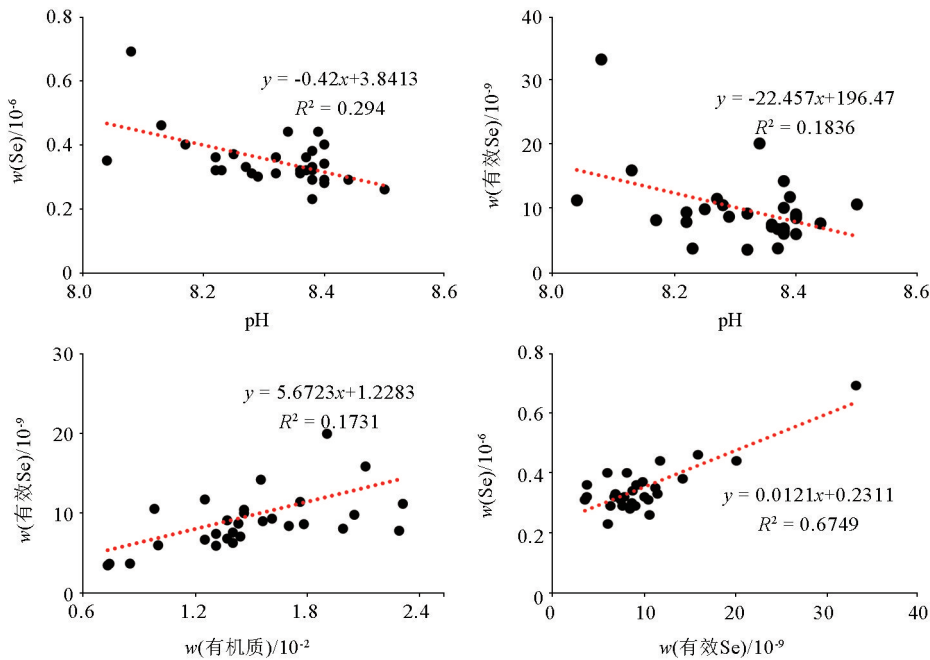


图 4 根系土全 Se 和土壤有效 Se 与土壤 pH、有机质指标的关系

Fig. 4 Relationship between total Se and available Se of root soil and soil pH and organic matter indexes

表 3 硒与其他指标的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between selenium and other indicators

指标	N	P	Se	Zn	K ₂ O	有机质
Se	0.371 *	0.431 *	1	0.370 *	0.397 *	0.294
有效硒	0.462 *	0.645 **	0.822 **	-0.007	0.283	0.416 *
指标	pH	碱解氮	F	有效硫	速效磷	有效硒
Se	-0.542 **	0.237	0.467 **	0.729 **	0.341	0.822 **
有效硒	-0.428 *	0.493 **	0.167	0.684 **	0.445 *	1

注:“**”表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的;“*”表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

壤中的大量养分丰缺程度也影响着土壤中硒的含量及生物有效性,N、P 养分含量的增加可以显著提高土壤硒含量及其生物有效性,这对人工调控土壤 Se 含量具有重要的理论意义。土壤中 Se 和 S 的化学性质和形态相似,其含量有明显的相关性,土壤对 Se 和 S 的吸附也具有相似性^[28]。同样,在富硒土壤区域土壤 Se、有效 Se 与有效 S 都具有显著线性相关(表 3)。

3.3.4 土壤 Se 形态特征

一般土壤中的硒形态按浸提方法可分为 7 步形态。富硒土壤区域水溶态硒的平均值为 0.01×10^{-6} ,占全硒的 2.91%,离子交换态硒的平均值为 0.007×10^{-6} ,占全硒含量的 1.95%,水溶态和离子交

换态又作为可交换态,直接被生物利用,两者合计约占全硒含量的 4.86%;碳酸盐结合态硒平均值为 0.003×10^{-6} ,占全硒含量的 0.97%,碳酸盐结合态和可交换态作为易利用态硒,三者之和占全硒含量的 5.83%;腐殖酸结合态硒的平均值为 0.042×10^{-6} ,占全硒的 11.81%,铁锰结合态硒的平均值为 0.007×10^{-6} ,占全硒含量的 1.87%,腐殖酸结合态和铁锰结合态又作为中等利用态,两者之和约占总硒含量的 13.69%;强有机结合态硒的平均值为 0.071×10^{-6} ,占全硒含量的 19.99%,残渣态硒的平均值为 0.212×10^{-6} ,约占全硒含量的 60.50%,强有机结合态和残渣态作为惰性态,两者之和占总硒含量的 80.48%。不同形态硒含量从大到小依次为残渣态>强有机结合态>腐殖酸结合态>水溶态>离子交换态>铁锰结合态>碳酸盐结合态。这与青海东部和浙中典型富硒区以有机结合态 Se 为主的研究结果有所不同^[29-30]。全硒含量与各形态相关性分析结果表明(表 4),土壤全硒含量与水溶态、离子交换态、腐殖酸结合态和残渣态 Se 都呈高度线性相关,相关系数从大到小依次为水溶态>腐殖酸结合态>离子交换态>残渣态,这也是研究区土壤中虽然全硒含量并不高,但土壤 Se 的生物有效性高的原因。

表 4 土壤全硒与各形态硒相关性分析系数
Table 4 Correlation analysis coefficients between whole soil selenium and each form of selenium

指标	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐殖酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态	全硒
水溶态	1							
离子交换态	0.986 **	1						
碳酸盐结合态	0.856 *	0.777	1					
腐殖酸结合态	0.839 *	0.783	0.719	1				
铁锰结合态	0.594	0.651	0.289	0.618	1			
强有机结合态	0.192	0.103	0.189	0.352	-0.394	1		
残渣态	0.933 **	0.949 **	0.804	0.731	0.616	-0.056	1	
全硒	0.941 **	0.905 *	0.801	0.927 **	0.487	0.424	0.856 *	1

注:“**”表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的;“*”表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

4 结论

1)研究区土壤 Se 含量范围为 $(0.05 \sim 0.76) \times 10^{-6}$,平均值为 0.24×10^{-6} ,首次划定富硒土壤和富硒耕地面积分别为 45.43 km² 和 27.58 km²;在富硒土壤分布区域种植的青稞籽粒中硒平均值为 0.063×10^{-6} ,油菜籽籽粒中 Se 平均值为 0.078×10^{-6} ,具有较好的开发富硒土地资源及富硒农产品的潜力。

2)研究区土壤 Se 含量主要受三叠系上统涅如组(T₃n)地层成土母质的自然地质背景控制;土壤理化指标氮、碱解氮、磷、速效磷、有效硫等含量的增加促进土壤中硒和有效硒的富集,而 pH 升高易于

流失土壤中的硒和有效硒。这对下一步寻找富硒土地方向及土壤中硒含量的人工调节具有重要的理论意义。

致谢:论文撰写的过程中得到了清华大学地球系统科学系和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所老师们的大力支持和帮助,在此致以真诚的谢意!

参考文献(References):

[1] 李军,张忠诚.微量元素硒与人体健康[J].微量元素与健康研究,2011,28(5):59-63.
Li J,Zhang Z C.Trace element selenium and human health[J].Studies of Trace Elements and Health,2011,28(5):59-63.

- [2] 李傲瑞,乔新星,赵飞飞,等. 硒与人体健康关系研究进展[J]. 绿色科技,2020,22(12):121-122.
- Li A R,Qiao X X,Zhao F F,et al. Research progress on the relationship between selenium and human health[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020,22(12):121-122.
- [3] 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(3):294-309.
- [4] 李顺江,李巍,胡霞,等. 西藏土壤—植物—动物(人)系统中硒含量与大骨节病的关系[J]. 生态学杂志,2008,27(12):2167-2170.
- Li S J,Li W,Hu X,et al. Distribution of Kashin-Beck disease (KBD) and its relation to selenium content in soil-plant-animal (humanbeing) ecosystem in Tibet[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008,27(12):2167-2170.
- [5] 李顺江,杨林生,王五一,等. 西藏大骨节病地区儿童发硒与病情分布的关系[J]. 中国地方病学杂志,2006,25(1):70-72.
- Li S J,Yang L S,Wang W Y,et al. Relationship between selenium concentrations in child hair and the distribution of Kashin-Beck disease in Tibet, China [J]. Chinese Journal of Endemiology, 2006,25(1):70-72.
- [6] Tan J A,Zhu W Y,Wang W Y,et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. Science of the Total Environment,2002,284(1):227-235.
- [7] 张晓平,张玉霞. 西藏土壤中硒的含量及分布[J]. 土壤学报,2000,37(4):558-562.
- Zhang X P,Zhang Y X. Content and distribution of selenium in soils of Tibet[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000,37(4):558-562.
- [8] 曲航,尼玛扎西,韦泽秀,等. 西藏土壤硒状况与富硒青稞生产路径[J]. 中国农业科学,2015,48(18):3645-3653.
- Qu H,N M Z X,Wei Z X,et al. Soil selenium (Se) status and the production on Se-enriched hullless barley in the Tibet autonomous region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18):3645-3653.
- [9] 曲航,尼玛扎西,韦泽秀,等. 西藏青稞产区土壤和籽粒硒含量调查研究[J]. 麦类作物学报,2020,40(7):890-896.
- Qu H,N M Z X,Wei Z X,et al. Investigation on selenium content in soil and hullless barley grains in Tibet[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020,40(7):890-896.
- [10] 杨忠芳,余涛,李敏,等. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:地质出版社,2016.
- Yang Z F,Yu T,Li M,et al. DZ/T 0295—2016 Specification of land quality geochemical evaluation[S]. Beijing:Geological Publishing House,2016.
- [11] 奚小环,陈国光,张德存,等. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- Xi X H,Chen G G,Zhang D C,et al. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey(1:250 000)[S]. Beijing:Standards Press of China,2015.
- [12] 奚小环,侯青叶,杨忠芳,等. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际[J]. 物探与化探,2021,45(5):1095-1108.
- Xi X H,Hou Q Y,Yang Z F,et al. Big data based studies of the variation features of Chinese soil's background value versus reference value:A paper written on the occasion of Soil Geochemical Parameters of China's publication[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(5):1095-1108.
- [13] 侯青叶,杨忠芳,余涛,等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京:地质出版社,2020.
- Hou Q Y,Yang Z F,Yu T,et al. Soil geochemical parameters of China[M]. Beijing:Geological Publishing House,2020.
- [14] 马强,姬丙艳,张亚峰,等. 青海东部土壤及生物体中硒的地球化学特征[J]. 地球科学进展,2012,27(10):1148-1152.
- Ma Q,ji B Y,Zhang Y F,et al. Geochemical characteristics of Selenium in soils and organisms in the east of Qinghai Province[J]. Advances in Earth Science,2012,27(10):1148-1152.
- [15] 刘金旭,陆肇海,苏琪. 家畜家禽的硒营养缺乏的调查研究——I. 我国饲料牧草含硒量的分布(初报)[J]. 中国农业科学,1985,18(4):76-81
- Liu J X,Lu Z H,Su Q. Regional selenium deficiency of feedstuffs in China. Scientia Agricultura Sinica,1985,18(4):76-81.
- [16] Wang J,Li H R,Yang L S,et al. Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan Plateau Kashin-Beck disease area[J]. Environ Geochem Health,2017,39(1):221-229.
- [17] 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.
- [18] 张春来,杨慧,黄芬,等. 广西马山县岩溶区土壤硒含量分布及影响因素研究[J]. 物探与化探,2021,45(6):1497-1503.
- Zhang C L, Yang H, Huang F,et al. Distribution and influencing factors of selenium content in soil in karst areas in Mashan County, Guangxi, China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(6):1497-1503.
- [19] Liu Y L,Tian X L,Liu R,et al. Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: A case study in Red Beds of Sichuan Basin, China[J]. Catena,2021,196(1):1-12.
- [20] 罗建川,周梅,王宗礼,等. 硒在草地放牧系统“土壤—植物—动物”间的流动与调控[J]. 草业科学,2017,34(4):869-880.
- Luo J C,Zhou M,Wang Z L,et al. Fluxion and regulation of selenium in soil, plants, and animals in grassland grazing system[J]. Pratacultural Science, 2017,34(4):869-880.
- [21] 徐文,唐文浩,邝春兰,等. 海南省土壤中硒含量及影响因素分析[J]. 安徽农业科学,2010,38(6):3026-3027.
- Xu W,Tang W H,Kuang C L,et al. Analysis on content of selenium in soil of Hainan Province and its influencing factors[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(6):3026-3027.
- [22] 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.

[23] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究 II · 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 404-410.
Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, et al. Hong kong soil researches II · Distribution and content of selenium in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 404-410.

[24] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837-849.
Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. Geoscience, 2012, 26(5): 837-849.

[25] 时章亮, 金立新, 廖超, 等. 四川雷波县重点耕地区土壤硒含量特征及其成因分析[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1253-1260.
Shi Z L, Jin L X, Liao C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1253-1260.

[26] 商靖敏, 罗维, 吴光红, 等. 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 301-308.
Shang J M, Luo W, Wu G H, et al. Spatial distribution of Se in soils from different land use types and its influencing factors within the Yanghe Watershed, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 301-308.

[27] 郭莉, 杨忠芳, 阮起和, 等. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 859-864.
Guo L, Yang Z F, Ruan Q H, et al. Content and distribution of selenium in soil of Beijing Plain[J]. Geoscience, 2012, 26(5): 859-864.

[28] 马友华, 张继榛, 竺伟民, 等. 土壤中硒和硫相互作用的研究[J]. 土壤通报, 2000, 31(4): 162-165.
Ma Y H, Zhang J Z, Zhu W M, et al. Study on interaction of selenium and sulfur in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(4): 162-165.

[29] 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.

[30] 黄春雷, 魏迎春, 简中华, 等. 浙中典型富硒区土壤硒含量及形态特征[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 155-159.
Huang C L, Wei Y C, Jian Z H, et al. Study on selenium contents and combined forms of typical selenium-rich soil in the central part of Zhejiang Province[J]. Earth and Environment, 2013, 41(2): 155-159.

Characteristics and influencing factors of Se content in the farmland system in Bailang County, Tibet, China

Duo-Ji-Wei-Se, Ci-Ren-Wang-Dui, Ni-Ma-Luo-Zhuo, ZHOU Peng, Ni-Ma-Ci-Ren
(Geothermal Geological Brigade, Tibet Bureau of Geology and Minerals Exploration, Lhasa 850032, China)

Abstract: The development of Se-rich land has been carried out in many regions of China, achieving remarkable results. However, no Se-rich land or crop has been reported in Tibet. This study analyzed the characteristics and influencing factors of the Se content in the soils and crops of the key arable land areas in Bailang County, Tibet, aiming to lend support to the development and utilization of Se-rich land in the Qinghai-Tibet Plateau. The results are as follows: The soils in the study area have a Se content of $(0.05 \sim 0.76) \times 10^{-6}$, which is higher than the background value of soils in Tibet (0.15×10^{-6}) ; 76.83% of the land in the study area has sufficient Se, and land in the study area with a Se content of greater than 0.3×10^{-6} covers an area of 45.43 km², as determined according to the standard threshold of Se content in alkaline soils ($w(\text{Se}) \geq 0.3 \times 10^{-6}$). Further investigation shows that highland barley seeds have a Se content of $(0.017 \sim 0.17) \times 10^{-6}$ (average: 0.063×10^{-6}) and rapeseeds have a Se content of $(0.043 \sim 0.14) \times 10^{-6}$ (average: 0.078×10^{-6}) in the distribution area of Se-rich soils. As indicated by the root soil results of the zones with Se-rich soils, the Nieru Group controls the source of Se in soils, and Se and effective Se content in the soils are significantly positively correlated with N, P, alkali-hydrolyzable nitrogen, and rapid available phosphorus but is significantly negatively correlated with pH. These results indicate that the behavior of Se is significantly affected by a large number of nutrient elements in the soils and pH. Overall, the distribution areas of Se-rich soils in Bailang County have high soil environmental quality, crops with a high Se content, and great potential for the development of Se-rich plateau characteristic agricultural products.

Key words: Se content in soil; highland barley; influencing factor; Tibet

(本文编辑: 蒋实)