

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.018

张丽, 张乃明, 张玉娟, 等. 云南耕地土壤硒含量空间分布及其影响因素研究. 土壤, 2021, 53(3): 578–584.

云南耕地土壤硒含量空间分布及其影响因素研究^①

张丽^{1,3}, 张乃明^{2,3*}, 张玉娟^{1,3}, 邓洪^{2,3}, 杨浩瑜^{2,3}

(1 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3 云南农业大学云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201)

摘要: 为了解云南耕地土壤硒含量状况, 采集了 640 个云南代表性耕地表层土壤样品, 对土壤硒含量空间分布特征及其影响因素进行研究。结果表明: ①云南省耕地土壤硒总量变幅在 0.05 ~ 7.12 mg/kg, 平均含量为 0.51 mg/kg, 达到富硒水平; ②不同成土母质发育的土壤硒含量差异较大, 基型结晶盐类的玄武岩等发育的土壤硒含量最高, 平均为 0.77 mg/kg; ③土壤类型对硒的含量影响明显, 其中棕壤硒含量平均为 1.24 mg/kg, 显著高于其他土壤类型, 石灰(岩)土硒含量最低仅为 0.21 mg/kg; 从行政区看位于滇东的曲靖市和昭通市土壤硒平均含量明显高于其他州市; ④相关分析表明, 土壤硒含量与土壤 pH 之间的相关性均没有达到显著水平; 而土壤硒含量与土壤有机质呈极显著的正相关性($r = 0.110$, $P < 0.001$), 说明有机质影响土壤硒的含量。

关键词: 耕地土壤; 硒; 空间分布; 影响因素

中图分类号: S159 文献标志码: A

Spatial Distribution of Se Content and Its Influencing Factors in Cultivated Topsoil in Yunnan

ZHANG Li^{1,3}, ZHANG Naiming^{2,3*}, ZHANG Yujuan^{1,3}, DENG Hong^{2,3}, YANG Haoyu^{2,3}

(1 Plant Protection Institute, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3 Yunnan Soil Fertility and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to clarify the selenium content of cultivated soil in Yunnan Province, 640 topsoil samples of farmlands in Yunnan were collected, and then its spatial distribution and influencing factors were studied. The results showed that the total Se content ranged from 0.05 to 7.12 mg/kg, with an average content of 0.51 mg/kg, reaching Se-rich level. Soil Se contents were different between different parent materials, which was highest in soils derived from basalt of basic crystalline salt type, with an average of 0.77 mg/kg. Soil type had a significant effect on Se content, Se content was significantly higher in brown soil, with an average of 1.24 mg/kg, while was the lowest in lime soil (0.21 mg/kg). Average Se content was higher in Qujing and Zhaotong than in other areas. Correlation analysis showed that Se content was not significantly correlated with soil pH, but significantly positively correlated with soil organic matter ($r = 0.110$, $P < 0.001$), indicating that organic matter affects soil Se content.

Key words: Cultivated soil; Selenium; Spatial distribution; Influencing factors

硒(Se)是自然界一种高度分散的非金属元素, 1973 年, 世界卫生组织(WHO)宣布硒是人体生命活动中不可或缺的必需微量元素, 其丰缺状况与人体健康息息相关^[1]。研究发现, 人类的心血管疾病、克山病、白内障和甲状腺等疾病均与人体缺乏微量元素硒有关^[2], 因此, 适量地摄入硒元素能够起到保护心肌健康、增强自身免疫力、抗氧化、抗衰老等生物学功能^[3-5]。另外, 大量流行病的调查资料显示^[6], 区域

性的心血管系统疾病的发病率与水源、土壤、饮食以及人体硒水平呈明显的负相关性, 对于缺硒类的人群, 饮食摄入补充硒元素是最主要的途径之一^[7], 而作物硒含量主要取决于土壤硒的背景值^[8]。由于硒在地球表面分布的高异质性, 使其分布、迁移及转化在很大程度上受制于环境地球化学性质和行为。研究发现, 成土母质是影响土壤硒含量的主要控制因素, 而成土过程、土壤理化性质及气候条件等因素也是重要

①基金项目: 云南省重点研发计划项目(2018BC003)和国家重点研发计划项目(2018YFD0800603)资助。

* 通讯作者(zhangnaiming@sina.com)

作者简介: 张丽(1989—), 女, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染与防治方面的研究。E-mail: zhangyunli0202@126.com

的影响因素^[9-13], 各种因素的共同作用决定了一个区域土壤硒的丰缺, 但不同地区的影响因素作用大小因地而异。有学者认为高硒土壤主要继承了富硒岩石和煤层, 页岩、泥质沉积物及磷酸盐岩的硒含量通常可能较高^[14-16]。王秋爽等^[17]对广东省揭西县土壤硒影响因素的研究和刘永贤等^[18]对广西浔郁平原富硒土壤成因及影响因素的研究也证实了成土母质、土壤理化性质均能够影响土壤硒含量。

土壤硒在长期地球化学循环过程中极易发生次生富集与贫化^[19]。从已有文献资料来看, 我国从东北至西南存在一条较为明显的缺硒地带, 国土面积中有 72% 的土壤存在不同程度的缺硒现象, 硒含量不足 0.1 mg/kg, 其中云南省属于严重缺硒以及缺硒病经常发生的地区^[20]。研究证实, 硒元素的缺乏是大骨节病和克山病这两种地方流行病的主要环境危险因素之一^[21-22]。另有研究发现, 云南不明原因猝死病区的水和土壤中硒水平显著低于非病区组^[23]。且云南克山病具有明显的地域性, 病区以滇中北部的楚雄为中心, 向滇东北及滇西河谷地区延伸, 呈现一条弧形分布带^[24]。我国主要土壤类型耕作土表层硒含量范围为 0.038 ~ 3.081 mg/kg, 平均值为 0.269 mg/kg^[25]。从东北地区的暗棕壤(均值 0.12 mg/kg)、黑土(0.11 mg/kg)到西南方向的红黄壤、棕壤和红壤(均值 0.09 mg/kg), 低硒带内的土壤硒含量均值显著低于中国其他地区的土壤硒含量^[26]。20 世纪 80 年代的调查数据显示, 云南省为严重缺硒地带, 但最新的区域地球化学调查显示云南发现多个区域的富硒土壤, 由于以往调查数据的年代较为久远, 且调查面积及采集土壤样本数量的局限性, 云南土壤硒含量丰缺状况究竟如何尚无明确的结论。因此, 为了进一步详细了解云南耕地土壤硒含量的真实状况, 在云南 16 个州市开展了全面的调查研究, 并深入分析了成土母质、土壤类型和土壤性质对土壤硒含量的影响, 不仅能够科学认识云南土壤硒的含量分布特征, 而且可为富硒农产品开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

云南省位于中国西南边陲, 位于 97°31'~106°12'E, 21°08'~29°15'N。东西宽 865 km, 南北长 990 km, 国土面积 38.32 万 km²。云南地势呈现西北高东南低的特征, 海拔高差较为悬殊, 相对平缓的山区只占总面积的 10%, 大面积土地高低差参, 纵横起伏。由于其地势的特殊性, 气候类型复杂多样, 兼

具低纬气候、季风气候、山原气候的特点, 年温差小, 日温差大, 干湿季节分明, 大部分地区年降雨量在 1 000 mm 以上, 但地域分配极不均匀。土壤类型主要以红壤、赤红壤、砖红壤、紫色土、黄壤、水稻土等为主, 土壤成土母质类型多样, 主要为酸性结晶岩类的花岗岩等、基性结晶岩类的玄武岩等、紫色岩类和碳酸盐岩类等。

1.2 土壤采样点布置及样品采集

云南耕地表层土壤采样点以随机采样调查为主, 同时采样点布局兼顾均匀性与合理性, 以便最大限度控制代表耕地面积, 样品兼顾分布面积较大的旱地和水田等。样品采集以代表性为主要原则, 由 3~5 个点多样点混合采集 0~20 cm 表层土壤组合而成。本研究样品采集及分析于 2018 年 7 月至 2019 年 2 月进行, 共涉及昆明市、文山州、曲靖市、玉溪市、红河州、迪庆州、怒江州和普洱市等 16 个州市, 基本覆盖了云南省全部地区, 共采集土壤样品 640 个, 土壤采样点位分布如图 1 所示。所有采样区域根据农田地块特点布设采样点, 采集耕作表层土壤(0~20 cm), 采集多点混合样, 四分法取 2 kg 土壤样品带回实验室。土壤样品放置于阴凉通风处自然风干、过筛、备用。

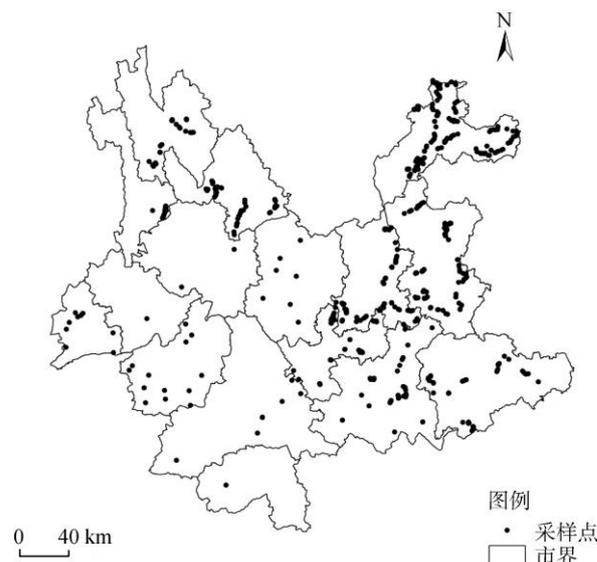


图 1 土壤采样点分布图
Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

1.3 土壤硒分级标准

表层土壤硒含量分级标准见表 1。

1.4 分析测定

参照 NY/T 1104—2006 方法对土壤全量硒进行测定。具体测定方法如下: 取风干后的土样, 用四分

表 1 表层土壤硒丰缺划分界限值^[27]
Table 1 Grading standard of topsoil Se content

含量分级	全量硒阈值(mg/kg)	硒效应
缺乏	≤0.125	硒反应不足
边缘	0.125 ~ 0.175	硒潜在不足
适量	0.175 ~ 0.40	足硒
高	0.40 ~ 3.00	富硒
过剩	>3.00	硒中毒

法取适量样品后,全部粉碎,过 0.149 mm 孔径筛,混匀后作为测定全硒的待测样品。从待测样品中取 2 g 于 100 ml 三角瓶中,加入硝酸-高氯酸混合酸放置过夜进行消化至无色,继续消化至冒白烟后取下稍冷,向三角瓶中加入 10 ml 1:1 盐酸溶液置于沸水浴中加热 10 min,取下冷却转入 50 ml 容量瓶中定容至刻度,摇匀,使用原子荧光仪(型号: XGY-1011A)进行测定。土壤 pH 采用电位法测定;土壤有机质采用氧化还原容量法测定。

1.5 统计分析

所有数据采用统计软件 SPASS 19.0 和 Microsoft Excel 2007 完成描述性统计分析、单因素方差分析及 LSD 多重比较,运用 ArcGIS 10.0 地统计软件进行制图。

表 2 表层土壤硒含量统计特征
Table 2 Statistics of topsoil Se content

采集位置	样品数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	方差	偏度	峰度
表层(0 ~ 20 cm)	640	0.05	7.12	0.51	0.56	0.32	5.47	46.88

2.1.2 云南耕地土壤各等级硒含量占比 根据表 1 中土壤硒含量丰缺的划分标准,由各含量分级样品数分别占总样品数的百分数求得研究区不同硒含量等级的占比,结果如图 2 所示。土壤硒含量处在缺乏和边缘等级的土壤较少,占 13.44%;土壤硒含量介于 0.175 ~ 0.40 mg/kg 属于适量等级的占比为 43.59%;土壤硒含量介于 0.40 ~ 3.00 mg/kg 属于富硒土壤的占比为 42.03%;土壤硒达到过剩等级的仅占 0.94%。总之,研究区硒含量大于 0.175 mg/kg 的占比为 86.56%,由此说明研究区内耕地土壤硒含量总体较为适量,属于足硒土壤,这在一定程度上颠覆了云南土壤总体缺硒的传统观点。

2.1.3 云南耕地土壤硒含量空间分布 利用 ArcGIS 对云南耕地土壤表层硒含量进行普通克里格插值,插值结果见图 3。由图 3 可以看出,耕地土壤硒含量较高的区域主要集中在研究区东北部、东部、南部和西南部,并总体呈现出由东北部、东部、南部和西南部边缘地带逐渐向中西部递减的趋势。据估算

2 结果与讨论

2.1 云南省耕地土壤硒含量特征与空间分布

2.1.1 云南耕地土壤硒含量分布特征 调查结果显示(表 2),云南农田耕地土壤硒元素含量范围为 0.05 ~ 7.12 mg/kg,平均值 0.51 mg/kg。与我国其他地区表层土壤全硒含量相比,研究区耕地土壤全硒含量平均值仅次于海南省^[28]和香港^[29],高于黑龙江省^[30]和西藏大骨节病区^[31],低于恩施市^[32]硒毒区。与我国^[33]和世界^[34]土壤硒含量均值相比,研究区耕地土壤硒含量平均值分别是我国和世界的 1.76 倍和 1.28 倍。标准差和方差是测算数据离散趋势最重要、最常用的指标,其反映了数据的离散程度。由表 2 统计结果可见,本研究区耕地土壤硒元素的标准差和方差均较大,表明硒元素含量在耕地土壤中比较分散,样本数据波动较大。偏度系数反映了样本数据分布的不对称性,表 2 统计结果中,表层土壤偏度系数大于 0,表明均值位于峰值的右边,呈现正偏向;峰度系数测度了数据在均值附近的集中程度,硒元素在表层土壤中峰度系数小于 0,表明数据分布集中程度高于正态分布。

可知,土壤硒元素含量大于 0.175 mg/kg 的耕地面积占云南省总面积的 4/5 以上,因此可推测,云南耕地土壤硒含量总体并不缺乏。

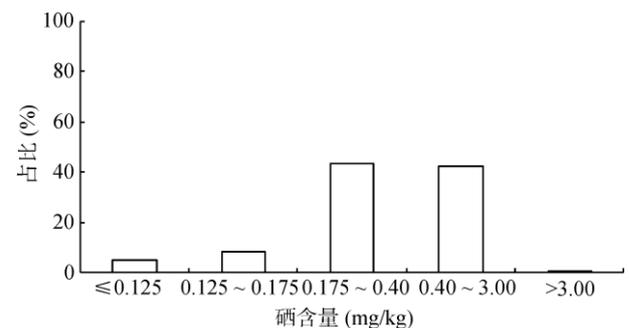


图 2 表层土壤各等级硒含量占比
Fig. 2 Percentage of topsoil Se content in each grade

2.2 成土母质对耕地土壤硒含量的影响

土壤硒含量受成土母质、地形地貌、土壤酸碱度等多种因素的影响,各个影响因素的影响大小因地而异^[35]。其中富硒岩石和煤系地层是高硒土壤的主要

来源。单因素方差分析表明,不同成土母质发育而来的耕地土壤平均硒含量差异达到了极显著水平($P<0.001$)。研究显示^[36-37],中国陆地土壤硒含量小于0.1 mg/kg的区域属于缺硒地区,低硒地区土壤硒含量为0.1~0.2 mg/kg,正常硒含量地区土壤硒含量为0.2~0.4 mg/kg,富硒土壤硒含量大于0.4 mg/kg。由表3可见,统计数据表明,研究区耕地土壤硒元素含量在不同母质发育区域的平均值范围为0.34~0.77 mg/kg,均达到正常硒含量范围。研究区以基型结晶盐类的玄武岩等发育而来的耕地土壤平均硒含量最高,平均含量可达0.77 mg/kg,达到富硒土壤水平,且基型结晶盐类的玄武岩发育而来的土壤硒含量最低值仅为0.21 mg/kg,也达到了正常硒含量的标准;其次是碳酸盐岩类、石英质盐类等发育而来的耕地土壤平均硒含量达0.67 mg/kg,也远远高于中国陆地土壤的富硒水平。其他几类岩类发育而来的土壤硒平均含量之间差异不显著,但均达到硒适量水平。变异系数的大小反映了人类活动的强弱,变异系数 $CV\leq 10\%$ 表示弱变异性, $10\%<CV<100\%$ 表示中等变异性, $CV\geq 100\%$ 表示强变异性^[38]。由表3可知,研究区碳酸盐

岩类、石英质盐类和紫色岩类土壤中硒的变异系数均大于100%,属于强变异性,说明其分布区域不均匀,其他几种母质类型发育而来的土壤硒含量变异系数均在10%~100%,属于中等变异程度。

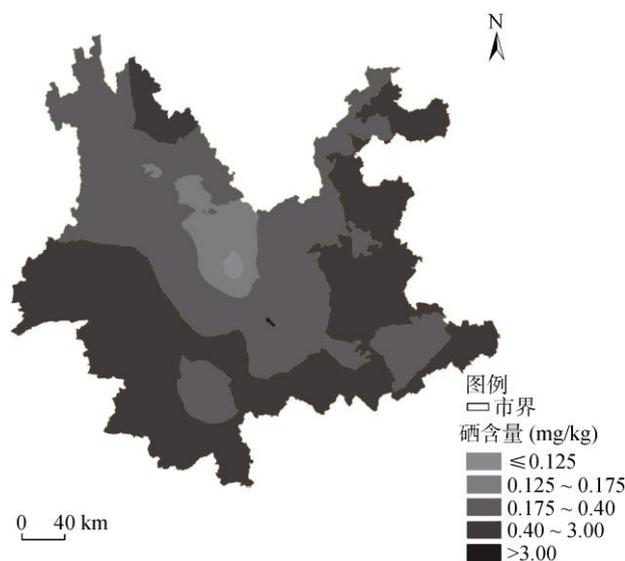


图3 表层土壤硒含量分布图
Fig. 3 Distribution of topsoil Se content

表3 不同类型成土母质发育土壤中总硒含量
Table 3 Topsoil total Se contents with different parent materials

成土母质	样品数	硒含量(mg/kg)			标准偏差 (mg/kg)	变异系数 (%)
		最大值	最小值	平均值		
变质岩的泥质岩类	23	0.76	0.08	0.34 d	0.17	51.64
基型结晶盐类的玄武岩等	63	2.74	0.21	0.77 a	0.60	77.74
泥质岩类	43	0.96	0.14	0.46 bcd	0.18	40.01
酸性结晶岩类的花岗岩等	78	1.87	0.06	0.51 bcd	0.40	77.74
碳酸盐岩类	249	1.62	0.08	0.41 cd	0.28	67.90
碳酸盐岩类、石英质盐类	36	7.12	0.05	0.67 ab	1.21	180.63
紫色岩类	148	5.82	0.05	0.57 bc	0.77	134.93

注:表中同列数据小写字母不同表示差异达 $P<0.05$ 显著水平,下表同。

2.3 土壤类型对耕地土壤硒含量的影响

云南是典型的红壤区,但由于其气候类型的多样性,成土母质发育而来的土壤类型不仅包括红壤,还包括黄壤、石灰性土及褐土等。研究区不同土壤类型中土壤硒元素含量统计见表4。单因素方差分析表明,不同土壤类型的耕地平均硒含量达到了显著水平($P<0.05$)。数据统计显示:表层土壤硒元素含量在不同类型土壤的平均值均达到硒适宜量的等级(≥ 0.175 mg/kg),其中除了石灰(岩)土和紫色土,其他土壤硒平均含量均达到0.40 mg/kg以上,达到富硒土壤的等级。农田耕地土壤中,以棕壤的硒平均含量显著最高,可达1.24 mg/kg;红壤硒平均含量显著高于石

灰(岩)土;其他类型土壤硒平均含量范围介于0.36~0.46 mg/kg,各类土壤硒平均含量之间差异不显著。由表4可知,研究区内褐土、红壤和棕壤硒含量的变异系数均大于100%,属于强变异性;其他类型土壤硒含量的变异系数介于10%~100%,均属于中度变异程度。其中红壤表层硒含量的变异系数最大,说明红壤硒含量受人为活动的影响较其他类型土壤大。

2.4 不同州市耕地土壤硒元素的分布特征

由于大理州、保山市和西双版纳州的采样点少于3个,因此不列入表中进行分析。其他13个州市进行单因素方差分析表明,各州市之间的耕地土壤硒含量差异达到了极显著水平($P<0.001$)。由表5可见,

各州市耕地土壤硒平均含量范围在 0.09 ~ 0.72 mg/kg, 除了楚雄州外, 其他各州市土壤硒平均含量均达到了硒适宜及以上水平(≥ 0.175 mg/kg)。其中, 曲靖市土壤硒平均含量最高, 为 0.72 mg/kg; 楚雄州最低, 为 0.09 mg/kg, 属于缺硒土壤; 富硒耕地土壤主要分布在昭通市、红河州、昆明市、曲靖市、德宏州、临沧市和文山州; 硒适量耕地土壤主要分布在迪庆州、玉

溪市、怒江州、普洱市和丽江市。需要说明的是, 未列入表中的大理州土壤硒含量属于缺乏级别, 保山市和西双版纳州土壤硒含量均达到富硒级别, 由此可见, 除了局部地区外, 研究区土壤硒含量总体并不缺乏。此次研究结果与云南省各州市土壤硒背景值相比较可知, 除怒江州和楚雄州以外, 研究区其他州市耕地土壤硒含量均不同程度高于背景值。

表 4 不同土壤类型总硒含量
Table 4 Topsoil total Se contents in different soil types

土壤类型	样品数	硒含量(mg/kg)			标准偏差 (mg/kg)	变异系数 (%)
		最大值	最小值	平均值		
褐土	69	3.64	0.05	0.45 bc	0.47	103.74
红壤	384	7.12	0.06	0.55 b	0.64	115.52
黄壤	102	2.77	0.08	0.46 bc	0.40	87.46
石灰(岩)土	13	0.44	0.12	0.21 c	0.09	43.67
水稻土	53	1.62	0.10	0.43 bc	0.29	67.08
紫色土	24	1.18	0.05	0.36 bc	0.31	84.94
棕壤	5	3.26	0.19	1.24 a	1.25	101.09

表 5 不同区域表层土壤总硒含量及分级
Table 5 Topsoil total Se contents and grades in different regions

州市	样品数	硒含量(mg/kg)			硒背景值① (mg/kg)	硒分级
		最大值	最小值	平均值		
昭通市	134	7.12	0.045	0.71 a	0.291	高
迪庆州	35	1.02	0.075	0.39 abc	0.250	适量
红河州	50	1.87	0.15	0.60 ab	0.423	高
昆明市	85	1.62	0.17	0.41 abc	0.289	高
玉溪市	54	1.41	0.12	0.35 abc	0.284	适量
怒江州	31	0.91	0.081	0.25 bc	0.668	适量
普洱市	11	0.781	0.23	0.38 abc	0.325	适量
曲靖市	103	2.74	0.14	0.72 a	0.302	高
丽江市	59	0.61	0.057	0.20 c	0.163	适量
楚雄州	7	0.135	0.046	0.09 c	0.135	缺乏
德宏州	9	0.89	0.37	0.64 a	0.391	高
临沧市	13	0.94	0.425	0.62 a	0.456	高
文山州	46	1.11	0.18	0.43 abc	0.363	高

2.5 土壤理化性质对耕地土壤硒含量的影响

硒的迁移性与许多生物物理-化学参数息息相关, 其中土壤 pH 和有机质是反映土壤理化性质的重要指标。研究发现, 硒的迁移、溶解在很大程度上取决于吸附/解吸反应、pH、有机无机络合以及在土壤和沉积物中的溶解过程^[39-40]。本研究对云南表层土壤硒含量与土壤 pH、土壤有机质含量进行相关性分析,

结果表明, 当土壤 pH ≤ 7.0 时, 土壤硒含量与土壤 pH 呈正相关, 但没有达到显著水平($r=0.065$); 当土壤 pH > 7.0 时, 土壤硒含量与土壤 pH 呈负相关, 也没有达到显著水平($r=-0.080$)(图 4); 而土壤硒含量与土壤有机质则呈现出极显著的正相关性($r=0.110$, $P<0.001$)(图 5)。

土壤硒的存在形式主要有硒化物、有机硒化物、亚硒酸盐和硒酸盐等, 而土壤 pH 是控制亚硒酸盐和硒酸盐之间转化的主要因素。通常情况下, 在酸性和中性的条件下硒主要以亚硒酸盐(SeO_3^{2-})的形态存在,

① 国家环境保护局. 云南土壤环境背景值研究[R]. “七五”国家科技攻关环保项目. 1990: 123-124.

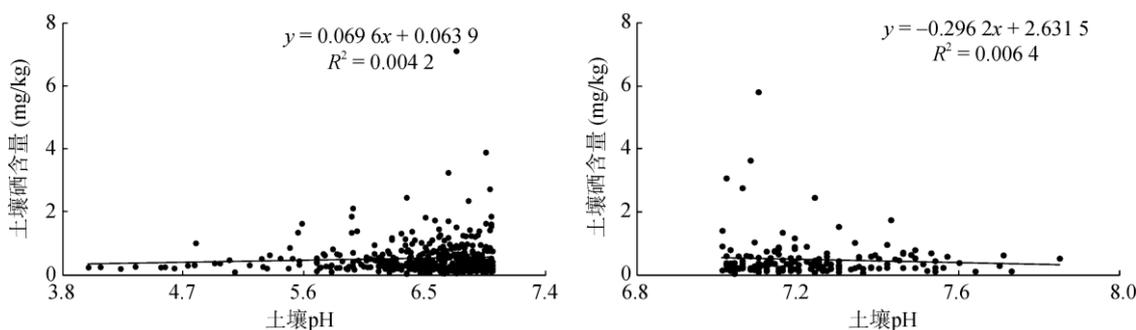


图4 表层土壤硒与 pH 的相关性分析

Fig. 4 Correlation between topsoil Se content and pH value

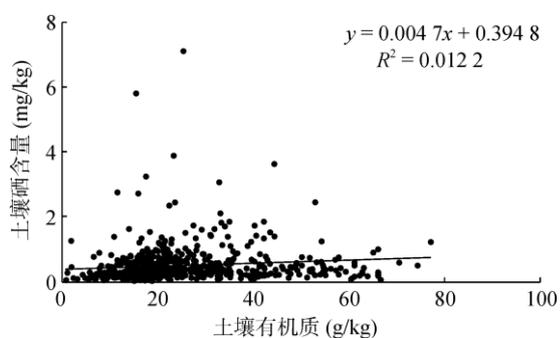


图5 表层土壤硒与有机质的相关性分析

Fig. 5 Correlation between topsoil Se and organic matter contents

极易被吸附固定在土壤中的铝、铁或锰的氢氧化物上^[12]，迁移淋溶作用较弱；而在通气良好的碱性土壤中，硒主要以硒酸态(SeO_4^{2-})形式存在，硒酸盐溶解性好且不易被金属氧化物固定，移动性较强。因此，土壤 pH 越高，土壤中硒元素易被淋失，硒含量越低，戴慧敏等^[41]和曹容浩^[42]的研究均证实了此观点。但本文研究结果表明当土壤呈现酸性和中性时，土壤硒含量随 pH 的升高而增加；而当土壤呈现碱性时，土壤硒含量随 pH 的升高而降低，说明土壤 pH 对土壤硒含量的影响并不能一概而论，要进一步进行土壤 pH 阈值划定的研究。

土壤有机质对土壤硒的地球化学行为有显著的影响。土壤中约有 80% 的硒与有机质结合，富含有机质的土壤中，硒能够优先进入低分子量的腐殖质组分中，呈现与金属腐殖质复合的无机复合状态并在土壤中固定下来。因此，有机质对硒具有一定的吸附和固定作用^[43]。相对应的，土壤有机质自身分解过程中能够将已结合的部分硒释放出来，其腐殖质分解过程中产生的其他新产物也会促进硒的活化，导致土壤硒含量的下降。许多研究认为有机质与土壤硒含量密切相关^[44-45]，本研究结果也证实了此观点，土壤有机质含量与硒含量呈现出极显著的正相关性，即随着土壤有机质含量的增加，土壤硒

含量也随之增加。

3 结论

1) 云南耕地土壤硒元素含量平均值为 0.51 mg/kg，分别是全国和世界平均值的 1.76 倍和 1.28 倍，其中硒含量大于 0.175 mg/kg 的采样点位占总采样点的 4/5 以上，主要分布在滇东、滇南和滇西南，全省耕地土壤总体达到中等足硒水平。

2) 研究区基型结晶盐类的玄武岩等发育的土壤硒平均含量最高为 0.77 mg/kg，泥质岩类母质发育的土壤硒含量相对较低。

3) 棕壤硒平均含量显著高于其他土壤类型，且富硒土壤主要分布在曲靖市、昭通市、德宏州、临沧市和红河州等地，全省富硒土壤占比为 42.03%，可作为开发富硒农产品的后备区域；土壤有机质对硒的含量影响大于土壤 pH。

参考文献：

- [1] Bartnicki J, Alcamo J. Calculating nitrogen deposition in Europe[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 47(1/2): 101-123.
- [2] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [3] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/2/3): 1-7.
- [4] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *BioScience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [5] Berendse F, Van Breemen N, Rydin H, et al. Raised atmospheric CO_2 levels and increased N deposition cause shifts in plant species composition and production in sphagnum bogs[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(5): 591-598.
- [6] Matson P A, McDowell W H, Townsend A R, et al. The globalization of N deposition: Ecosystem consequences in

- tropical environments[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/2/3): 67–83.
- [7] Choudhary S, Blaud A, Osborn A M, et al. Nitrogen accumulation and partitioning in a high arctic tundra ecosystem from extreme atmospheric N deposition events[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 554: 303–310.
- [8] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 262–271.
- [9] Bergkvist B, Folkesson L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus-sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1992, 65(1-2): 111–133.
- [10] Skeffington R A. Accelerated nitrogen inputs - A new problem or a new perspective[J]. *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 1–11.
- [11] 王敬, 张金波, 蔡祖聪. 太湖地区稻麦轮作农田改葡萄园对土壤氮转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 166–176.
- [12] 曹彦圣, 付子轼, 孙会峰, 等. 施氮水平对水稻氮肥利用率和径流负荷的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 868–872.
- [13] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 795–801.
- [14] Christ M J, Peterjohn W T, Cumming J R, et al. Nitrification potentials and landscape, soil and vegetation characteristics in two central Appalachian watersheds differing in NO_3^- export[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(3): 145–158.
- [15] Chen X Y, Mulder J. Indicators for nitrogen status and leaching in subtropical forest ecosystems, South China[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82(2): 165–180.
- [16] Qian C, Cai Z. Leaching of nitrogen from subtropical soils as affected by nitrification potential and base cations[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 197–205.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] Lado-Monserrat L, Lull C, Bautista I, et al. Soil moisture increment as a controlling variable of the "birch effect". Interactions with the pre-wetting soil moisture and litter addition[J]. *Plant and Soil*, 2014, 379(1-2): 21–34.
- [19] Dancer W S, Peterson L A, Chesters G. Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous n treatments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(1): 67–69.
- [20] Li L M. Nitrification[M]//Zhu Z L, Wen Q, Freney J R. Nitrogen in soils of China. Netherland: Springer, 1997.
- [21] Faeflen J S, Li S W, Xin X P, et al. Autotrophic and heterotrophic nitrification in a highly acidic subtropical pine forest soil[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(6): 904–910.
- [22] 姜林, 耿增超, 李珊珊, 等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3368–3377.
- [23] 庄翔宇, 杨金玲, 张甘霖, 等. 亚热带花岗岩地区土壤矿物风化过程中盐基离子的释放特征[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 374–380.
- [24] Robison A L, Scanlon T M, Cosby B J, et al. Roles of sulfate adsorption and base cation supply in controlling the chemical response of streams of Western Virginia to reduced acid deposition[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 116(1-3): 119–130.
- [25] Guicharnaud R, Paton G I. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an andosol and a cambisol[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1-3): 279–283.
- [26] Hartikainen H. Soil response to acid percolation: Acid-base buffering and cation leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(4): 638–645.
- [27] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [28] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based n addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China?[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1-2): 213–221.
- [29] Zhang Y T, He X H, Liang H, et al. Long-term tobacco plantation induces soil acidification and soil base cation loss[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(6): 5442–5450.
- [30] Xu R K, Coventry D R, Farhoodi A, et al. Soil acidification as influenced by crop rotations, stubble management, and application of nitrogenous fertiliser, Tarlee, South Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(3): 483–496.
- [31] Noble A D, Gillman G P, Ruaysoongnern S. A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 233–243.
- [32] Watanabe T, Ogawa N, Funakawa S, et al. Relationship between chemical and mineralogical properties and the rapid response to acid load of soils in humid Asia: Japan, Thailand and Indonesia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(6): 856–869.