

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.10.014

# 福建龙海市土壤营养元素全量特征及有效量预测

赵辰<sup>1,2</sup>, 孙彬彬<sup>1,3\*</sup>, 周国华<sup>1,3</sup>, 贺灵<sup>1,3</sup>, 曾道明<sup>1,3</sup>

ZHAO Chen<sup>1,2</sup>, SUN Binbin<sup>1,3\*</sup>, ZHOU Guohua<sup>1,3</sup>, HE Ling<sup>1,3</sup>, ZENG Daoming<sup>1,3</sup>

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 河北 廊坊 065000;

3. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北 廊坊 065000

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;

2. Geochemical Research Center of Soil Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China;

3. UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang 065000, Hebei, China

**摘要:**以福建龙海市为研究区,在不同地质背景、土地利用方式、土壤类型和土壤成因类型条件下进行样品采集,共采集 56 件土壤样品,测定 pH 值、有机质含量(SOM)、阳离子交换量(CEC)、营养元素全量及有效量。利用相关分析、线性回归分析等统计手段,探究土壤中营养元素有效量的影响因素,建立并验证了研究区土壤中营养元素有效量的预测模型,以此深入了解区内土壤养分状况,为该区土地的合理利用及治理提供科学依据。结果表明:龙海市土壤呈酸性—强酸性,有机质含量较低,阳离子交换量偏低;土壤中 N、P、K、Mo、Zn 元素全量相对富集;元素全量、有效量及其有效度变异性较强;土壤中 B、Cu、K、Mn 等营养元素全量与有效量相关性较好,土壤 pH 值对 K、Mo、Si 的有效度有一定影响,CEC 与 Si 的有效度呈显著正相关,SOM 增加有利于提高 Cu、Fe、Mn、P、Zn 等元素有效量。通过土壤全量分析数据及土壤理化指标建立的线性模型,可以预测表层土壤中 Cu、Fe、Mo、Mn、P、S、Si 等营养元素的有效量,若引入更多影响因子,将有利于进一步提高模型的拟合效果,使得预测更准确。

**关键词:**福建龙海;土壤;营养元素;地球化学

**中图分类号:**P595;S15 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)10-1784-08

**Zhao C, Sun B B, Zhou G H, He L, Zeng D M. Investigation on the characteristics nutrient content and prediction of available nutrients content in the soil of Longhai, Fujian Province. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(10): 1784-1791**

**Abstract:** In this study, samples were collected in Longhai City, Fujian, under different geological backgrounds, land use types, soil types, and soil formation conditions. A total of 56 soil samples were collected and analyzed for pH value, organic matter content(SOM), cation exchange capacity(CEC), total and available nutrient content. Statistical methods such as correlation analysis and linear regression analysis were used to explore the factors influencing the available nutrient content in the soil. A prediction model for the available nutrient content in the soil of the study area was established and validated. This study aims to gain a comprehensive understanding of the nutrient status of the soil in the area and provide scientific basis for the rational utilization and management of land in the region. The results show that in the study area, the soil in Longhai City is characterized by acidity to strong acidity, low organic matter content, and a relatively low cation exchange capacity. The soil shows relative enrichment of elements such as N, P, K, Mo, and Zn in terms of total quantity. There is also significant variability in the total quantity, available quantity, and effectiveness of these elements. The soil analysis data reveals good correlations between the total and available quantities of nutrients such as B, Cu, K, and Mn. The pH of the soil has a

收稿日期:2021-02-25;修订日期:2021-12-20

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项经费项目《典型地质环境区红壤化过程地球化学特征研究》(编号:201411091-2)和中国地质调查局项目《主要农耕地土地质量地球化学调查》(编号:DD20221770)

作者简介:赵辰(1995-),男,硕士,助理工程师,从事生态地球化学调查工作。E-mail:619138825@qq.com

\* 通信作者:孙彬彬(1982-),男,博士,教授级高级工程师,从事生态地球化学调查工作。E-mail:sbinbin@mail.cgs.gov.cn

certain influence on the effectiveness of K, Mo, and Si, while the cation exchange capacity(CEC) shows a significant positive correlation with the effectiveness of Si. Increasing soil organic matter(SOM) is beneficial for improving the available quantities of elements such as Cu, Fe, Mn, P, and Zn. Linear models based on soil analysis data and soil physicochemical indicators can be used to predict the available quantities of nutrients such as Cu, Fe, Mo, P, S, and Si in the surface soil. Introducing more influencing factors would further improve the fitting effect of the models and enhance the accuracy of predictions.

**Key words:** Longhai, Fujian; soil; nutrient elements; geochemistry

土壤中的 B、Cu、Fe、K、Mn 等营养元素作为植物正常生长所必需的元素,是反映土壤肥力水平的主要指标,直接影响植物的生长发育(陶睿,2017;张华国,2020)。土壤元素有效量指以相对活动态存在于土壤中,能被植物直接吸收利用的那部分元素含量。土壤中植物营养元素的有效量是决定土壤肥力和产能的关键因素,与元素全量相比,能更有效地反映植物营养元素的供给能力(姜冰等,2023)。元素有效量受诸多因素影响,在土壤类型、地貌类型、土地利用类型等因素影响下,土壤中元素全量及各类理化指标均会发生变化,从而改变元素有效量。武钦萍等(2012)发现,某矿区土壤中 Cu、Mn、Fe、Zn 等元素有效量与土壤有机质呈正相关,与 pH 值呈负相关;姜冰等(2021)研究显示,元素全量、pH 值、土壤有机质含量(SOM)、土壤类型等因素对土壤中 N、P、K 及其他营养元素有显著控制作用;骆珊等(2021)通过毕节市耕地土壤各微量元素的相关分析,发现成土母质为影响土壤微量元素丰缺及分布的主要因素;丁文广等(2012)在甘肃省干旱区的研究发现,SOM、全氮与速效氮呈显著正相关,全氮、全磷与速效钾呈显著正相关。

龙海市是福建省重要农业种植区,水稻主产区,耕地资源极其丰富,该区已于 1:5 万土地质量地球化学调查工作中查明全区土壤 pH 值、阳离子交换量(CEC)、SOM、N、P、K、B、Mo 等养分指标,但并未系统分析测试营养元素有效量。本文利用统计分析、相关分析、回归分析等方法,探究龙海市土壤的理化指标和营养元素含量特征及营养元素有效量的影响因素。随机抽取 48 件土壤样品的分析测试结果,以土壤营养元素全量及理化指标为自变量,建立土壤营养元素有效量多元回归方程,验证后以构建区内土壤中营养元素有效量的预测模型,通过该模型估算龙海市内表层土壤中营养元素的有效量,以期为龙海市土壤施肥管理、农业生产及土地利用规划提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

龙海市地处福建省东南部,漳州市东部,为九龙江下游冲击平原及低山丘陵区,地理位置北纬  $24^{\circ}11' \sim 24^{\circ}36'$ 、东经  $117^{\circ}29' \sim 118^{\circ}14'$ ,属南亚热带季风气候,降水充沛,夏少酷暑,冬少严寒,自然景观四季常绿。地质构造上位于闽东火山断拗带南段,以中、酸性火山岩、晚中生代陆相中酸性火山岩及燕山期花岗岩类大面积分布为主。地层主要为晚侏罗世南园组、新近纪佛昙组等火山岩地层和更新世龙海组、全新世长乐组等沉积地层。侵入岩分布广泛,尤其在东、西部地区,主要岩性为酸性、偏酸性、中酸性岩,少量基性岩,时代主要为晚侏罗世和早白垩世。

龙海市土壤形成受成土母岩类型影响极大,由于地形地貌、成土母质分布的区域性差异,以及长期土地利用方式等人为因素影响,形成了该区土壤类型复杂多样的特点。该区土壤分为 6 个土类,16 个亚类,51 个土属,71 个土种,主要包括赤红壤、红壤、水稻土等(刘银飞等,2016)。龙海市土地利用类型齐全,主要包括耕地、园地、林地等。作为福建省重要的农业种植区,龙海市的农业以水稻为主,为高产、优产地区,荔枝、龙眼、柑桔、杨梅等水果名扬省内外(周国华等,2018)。

### 1.2 样品采集与测试

土壤采样分析本质上是抽样调查,调查结果不可避免地受到抽样数量和样本代表性的影响。本次研究在龙海市范围内以典型性和代表性为原则,根据区内不同的地质背景、土地利用方式、土壤类型、成因类型及其分布面积,共布设采集了 56 件土壤样品(图 1),具体样品分类统计见表 1。在采样点位处采集表层土壤样品(0~20 cm),以样点为中心,在周围 20~50 m 范围内采用“S”形或“X”形取样法进行多点取样,每件土壤样品由 4~6 件子样等量混合组成。使用四分法保留约 2.5 kg 土壤样品,

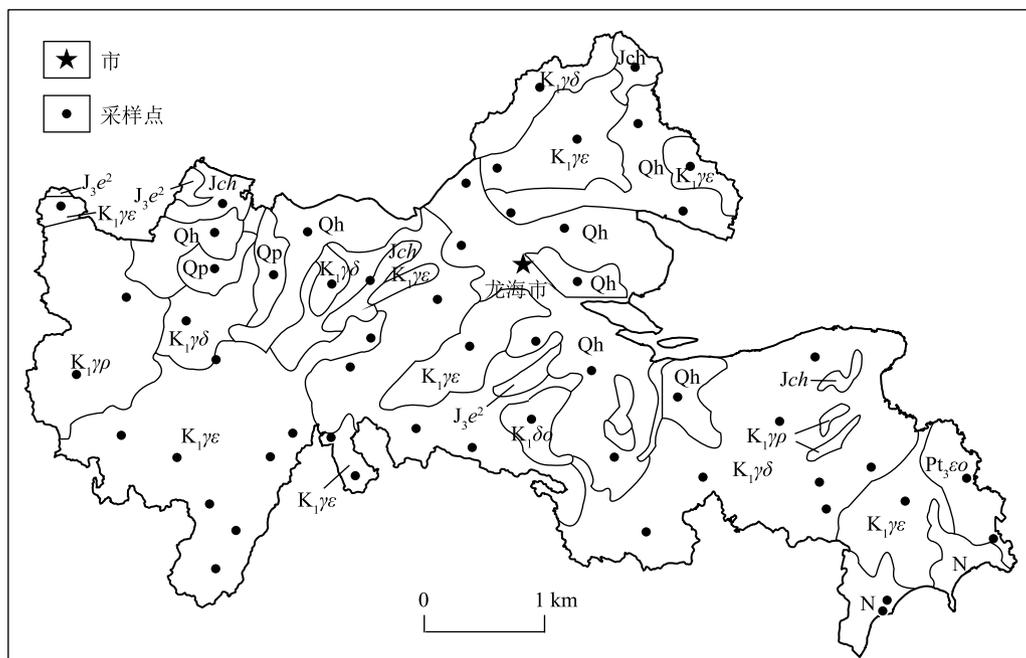


图1 研究区位置及采样点位

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

Qh—第四系全新统海积物; Qp—第四系更新统粘土砾卵石、粘土、海积砂、风积沙; N—新近系玄武岩; Jch—赤水组下段英安岩、英安质凝灰岩、熔结凝灰岩;  $J_3e^2$ —鹅宅组上段流纹岩、流纹质凝灰岩、凝灰岩、页岩;  $K_{1\gamma p}$ —早白垩世碱长花岗岩;  $K_{1\gamma e}$ —早白垩世钾长花岗岩;  $K_{1\gamma \delta}$ —早白垩世花岗闪长岩;  $K_{1\delta o}$ —早白垩世石英闪长岩;  $Pt_3\epsilon o$ —新元古界二云片岩、细砂岩、粉砂岩,局部为混合岩

经自然风干后,去除土壤样品中的石块、根系等杂质,经橡皮锤反复碾压后全部过10目尼龙筛,充分混匀、称重后,装入聚乙烯塑料样品瓶,用以测定土壤营养元素含量。

样品分析测试由河南省岩石矿物测试中心完成。土壤样品的测定指标包括pH值、有机质、阳离子交换量(CEC)、B、Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Mo、N、P、S、Si、Zn等元素的全量及有效态含量,具体测试

方法参照《区域地球化学勘查样品分析方法》(叶家瑜等,2004)与《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005—03)(中国地质调查局,2005)中的有关方法。样品分析采用国家一级标准物质和重复样监控分析质量,分析结果的检出限、准确度、精密度等质量指标均达到了中国地质调查局颁布的《多目标区域地球化学调查规范》(DD2005—01)(中国地质调查局,2005)的要求。

表1 土壤样品分类统计

Table 1 Classification statistics of soil samples

地质背景	样品数量	土地利用	样品数量	土壤类型	样品数量	成因	样品数量
第四系冲洪积	14	果园	16	红壤	37	残积土	30
第四系全新统玄武岩	1	旱地	22	水稻土	16	冲洪积	13
燕山期中酸性岩	34	林地	16	滨海沙泥	1	冲积	3
侏罗系火山岩	7	水田	2	潮土	1	坡-冲积	3
/	/	/	/	黄壤	1	坡积物	7

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质特征

土壤酸碱度可以控制土壤中微生物的活动,有机质的合成与分解,氮、磷等元素的转化与释放,微量元素的有效性,以及土壤保持养分的能力(李杨等,2020)。土壤在一定母质来源、成土因素及人类生产活动的影响下,具有一定的酸碱反应范围(严明书等,2019)。根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)(中华人民共和国国土资源部,2016)中土壤酸碱度分级标准,pH<5.0 为强酸性、pH5.0~6.5 为酸性、pH6.5~7.5 为中性、pH 7.5~8.5 为碱性、pH $\geq$ 8.5 为强碱性。龙海市表层土壤酸碱度统计情况显示(表 2),研究区表层土壤 pH 值变化范围为 4.18~7.8,中位数为 5.47,变异系数为 0.12。龙海市表层土壤以酸性和强酸性为主,分别占总样本数的 67.86% 和 25.00%,中性土壤占 5.36%,碱性土壤占 1.79%,不存在强碱性土壤。

土壤有机质(SOM)是土壤重要的组成部分,也是控制土壤养分供应能力和氮、磷等元素循环的重要因子,土壤的物理、化学性质及土壤肥力等都与土壤有机质含量密切相关(谢国雄等,2020)。由表 3 可知,龙海市表层土壤有机质含量变化于 0.27%~3.98%之间,平均值为 1.89%,中位数为 1.69%,变异

系数为 0.44。根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)(中华人民共和国国土资源部,2016)中土壤有机质分级标准,有机质含量>4% 为丰富,3%~4% 为较丰富,2%~3% 为中等,1%~2% 为较缺乏, $\leq$ 1% 为缺乏。由此可见,研究区土壤有机质可分为 4 个等级,以较缺乏和中等为主,分别占总样本数的 50.00% 和 26.79%,缺乏和较丰富样本分别占总样本数的 12.50% 和 10.71%,不存在丰富土壤。

土壤阳离子交换量(CEC)是交换性盐基(钾、钠、钙、镁等)的总量(杨秀珍等,2012),可反映土壤保肥性、缓冲性能和环境容量(刘蓉等,2020),是评价土壤肥力和指导土壤改良的重要指标。阳离子交换量含量高,土壤保肥性能好,肥料流失量小,表现良好的稳肥性(范宏迪等,2011)。龙海市表层土壤阳离子交换量在 1.96~36.71 cmol/kg 之间,平均值为 8.47 cmol/kg,中位数为 6.09 cmol/kg,变异系数为 0.76。根据《中国土壤普查技术》(全国土壤普查办公室,1992),阳离子交换量 $\geq$ 25 cmol/kg 为丰富,20~25 cmol/kg 为较丰富,15~20 cmol/kg 为中等,10~15 cmol/kg 为较缺乏,<10 cmol/kg 为缺乏。总体看,研究区土壤阳离子交换量整体偏低,绝大部分样本以缺乏为主(75.00%),其次为较缺乏(14.29%),中等、较丰富、丰富仅占样本总数的 5.36%、1.79% 和 3.57%。

表 2 表层土壤 pH 分布情况( $n=56$ )

Table 2 Distribution characteristics of pH in surface soil ( $n=56$ )

指标	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数	各级样本数所占比例/%			
							强酸性	酸性	中性	碱性
pH	5.49	5.47	7.80	4.18	0.64	0.12	25.00	67.86	5.36	1.79

表 3 表层土壤有机质含量及分级统计( $n=56$ )

Table 3 organic matter content and grading statistics in surface soil ( $n=56$ )

指标	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数	各级样本数所占比例/%			
							较丰富	中等	较缺乏	缺乏
SOM	1.89	1.69	3.98	0.27	0.83	0.44	10.71	26.79	50.00	12.50

表 4 表层土壤阳离子交换量含量及分级统计( $n=56$ )

Table 4 Cation exchange content and grading statistics in surface soil ( $n=56$ )

指标	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数	各级样本数所占比例/%				
							丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏
CEC	8.47	6.09	36.71	1.96	6.43	0.76	3.57	1.79	5.36	14.29	75.00

注:阳离子交换量含量单位为 cmol/kg

表5 表层土壤营养元素含量及变异系数( $n=56$ )Table 5 Nutrient content and coefficient of variation in surface soils ( $n=56$ )

元素	平均值	标准差	变异系数	中国土壤*	元素	平均值	标准差	变异系数	中国土壤*
B	10.9	12.6	1.16	48.0	Mo	1.97	1.52	0.77	0.80
Ca	0.30	0.45	1.52	1.57	N	995	529	0.53	640
Cu	17.4	15.2	0.88	24.0	P	936	666	0.71	520
Fe	2.53	1.50	0.59	2.94	S	267	134	0.50	/
K	2.23	1.09	0.49	1.91	Si	29.1	3.72	0.13	/
Mg	0.26	0.29	1.12	0.78	Zn	78.4	46.6	0.59	68
Mn	475	268	0.56	600	/	/	/	/	/

注:常量元素 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K 含量单位为  $10^{-2}$ ,其他为  $10^{-6}$ ; \*据《应用地球化学元素丰度数据手册》(迟清华等,2007)中国土壤化学元素含量(A层)算术均值

## 2.2 营养元素全量及有效量特征

根据龙海市 56 件表层土壤营养元素全量分析数据,统计获得地球化学参数值(表 5)。与中国表层土壤算术均值相比,龙海市表层土壤 N、P、K、Mo、Zn 相对富集,Ca、Mg、Mn、Cu、B 相对贫乏。从营养元素全量的变异系数看,绝大多数元素含量变化幅度非常大,分布极不均匀,尤其是 Ca、B、Mg 等元素,变异系数均超过 1.0;其余元素变异系数较小。

土壤元素有效量水平是表征土壤环境质量的重要因子,在农业生产过程中,微量元素有效量过量与缺乏均会严重影响植物的生长发育,进而影响人类身体健康(尹春艳等,2020)。由龙海市表层土壤营养元素有效量统计结果(表 6)可知,有效 B、有效 N 和有效 Si 变化范围较小、变异性弱,有效 K、有效 S、有效 Mn 变化范围较大、变异性较强,其他指标变化范围大、变异性强。总体看,区内表层土壤中植物营养元素有效态变化幅度很大,分布极不均匀。

表6 表层土壤元素有效量( $n=56$ )Table 6 Effective amount of surface soil elements ( $n=56$ )

有效态	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
有效 B	0.60	2.40	0.20	0.43	0.72
有效 Cu	5.04	40.68	0.30	7.04	1.40
有效 Fe	250	996	25	259	1.03
有效 K	0.57	2.64	0.07	0.43	0.75
有效 Mn	77	200	8	42.47	0.55
有效 Mo	0.32	1.07	0.06	0.22	0.69
有效 N	69.0	293	17.3	58.4	0.85
有效 P	93.05	572	1.53	114	1.22
有效 S	35.27	141.90	7.70	31.03	0.88
有效 Si	0.13	0.54	0.03	0.10	0.75
有效 Zn	13.19	122.02	1.60	21.40	1.62

注:有效 K、有效 Si 含量系统为  $10^{-3}$ ,其他为  $10^{-6}$

## 2.3 营养元素有效度特征

通常将土壤中植物营养元素有效量与全量的百分比称为有效度,是土壤元素生物有效性的表征指标。由龙海市 56 件表层土壤营养元素有效度平均值(表 7)可见,由于元素的表生地球化学行为不同,其有效度可从最小的 Si(0.05%)至最大的 Cu(25.8%),相差高达 500 余倍;有效度的变异系数普遍较高,除 Mn、Mo 小于 0.5 外,其他元素有效度变异系数均大于 0.5,其中 B、Fe、P 大于 1,尤其是 P 达 2.65。很显然,这与龙海市范围内地质背景多样,地貌类型复杂多变,土壤类型及其理化性状变化较大有关。另外,P 的有效度变异系数极大,可能与施肥扰动有关。

将龙海市表层土壤中各营养元素有效度平均值与广西桂平市、武汉市蔡甸区、浙江省北部地区等多地的同类元素有效度均值进行比较后发现(董岩翔等 2005;韦世勇,2017;徐宏林等,2017),不同土壤环境下,Cu、Mn、Mo、N、S、Si 等元素有效度特征相近;B、Fe、K、P、Zn 等元素有效度则大于其他地区同类有效度。

## 2.4 全量与有效量相关关系

土壤中植物营养元素有效量是决定土壤肥力和产能的关键指标,影响到作物生长、产量和品质。土壤矿物组成、质地、有机质含量、酸碱度、氧化还原电位、含水率等土壤理化条件构成的多相复杂体系决定了土壤元素赋存形态及其生物有效性,理论上讲,土壤元素有效量与其全量、土壤理化指标间存在特定关系。

由龙海市表层土壤营养元素有效量与全量的相关系数(表 8)可见,除 Fe、Si 有效量与全量无正

相关性外,其他营养元素有效量均与其全量达到正相关水平,表明土壤营养元素有效量虽然受到土壤环境条件的影响,但元素全量水平依然是决定其有效量的关键因素。从前文统计分析结果看,土壤 Fe、Si 全量不是决定其有效量的主要因素,显然有更重要的控制土壤 Fe、Si 有效量的因素。有研究发现,氧化还原-酸碱度决定了土壤铁价态及其生物有效性,在淹水还原条件下部分 Fe 以+2 价存在,具有较强的溶解度和迁移性,生物有效性较高;反之,在中碱性环境、氧化条件下,Fe 多以+3 价存在,溶解度和迁移性极弱,生物有效性低(李学垣,2001);土壤硅营养状况主要与可提取态硅(有效态硅、有机结合态硅、无定形硅)等有关,而与晶态硅(硅酸盐矿物、结晶二氧化硅)无关,土壤质地、酸碱性和有机质及农业耕作对土壤硅有效量有重要影响(臧惠林等,1982;赵送来等,2012)。

将离散点剔除处理后,大多数营养元素全量与有效量间的相关关系得到显著的改善,尤其是有效 B、有效 K、有效 Mn、有效 N、有效 P 等。因此,采用剔除离散点后的数据组,建立土壤营养元素有效量与全量的一元线性回归方程,是利用土壤营养元素

全量分析数据预测评价其有效量的可选方法之一。

### 2.5 土壤理化性质对有效度的影响

土壤中植物营养元素有效度与土壤理化指标间的相关性是土壤元素地球化学行为与土壤环境条件综合作用的结果,其实质是土壤离子浓度、酸碱度、氧化还原状况、质地(粘闭性)及其对离子的相互作用与滞留能力的综合反映。

本次统计了土壤营养元素有效度与土壤理化指标间的相关系数(表 9)。结果表明,营养元素 K、Mo、Si 的有效度与 pH 值呈显著正相关;Si 的有效度与阳离子交换量呈显著正相关;Cu、Fe、Mn、P、Zn 与有机质含量呈显著正相关,N 与有机质存在负相关关系。说明在龙海市表层土壤中,K、Mo、Si 有效度在酸性和强酸性土壤中受 pH 值的影响变化较大;在一定范围内,阳离子交换量对 Si 的有效度影响程度很大,相关系数高达 0.741;大量营养元素 P 和微量营养元素 Cu、Fe、Mn、Zn 均受有机质含量影响较大,在富含有机质的土壤中,易形成相对还原的环境而使 Fe、Mn 还原为活动性强的低价态,同时,活化元素可与有机物形成络合物而增加其有效性;相反,土壤中 N 与有机质含量呈负相关性,可能是土壤有机残体分解较慢,造成微生物吸收土壤中

表 7 表层土壤营养元素有效度平均值(n=56)

Table 7 Mean nutrient availability of nutrients in surface soil (n=56)

指标	B	Cu	Fe	K	Mn	Mo	N	P	S	Si	Zn
平均值	12.0	25.8	1.23	3.08	17.0	17.8	7.53	13.6	12.09	0.05	15.0
标准差	17.0	16.4	1.41	2.40	6.92	7.96	4.91	36.1	6.81	0.04	12.7
变异系数	1.42	0.64	1.14	0.78	0.41	0.45	0.65	2.65	0.56	0.86	0.85

表 8 表层土壤营养元素有效量与全量相关系数

Table 8 Correlation coefficients between the effective and full amounts of nutrient elements in surface soils

指标	全部样本		剔除离散点后		指标	全部样本		剔除离散点后	
	样本	R 值	样本	R 值		样本	R 值	样本	R 值
有效硼	56	0.333 *	48	0.426 * *	有效氮	56	0.392 * *	48	0.416 * *
有效铜	56	0.759 * *	51	0.688 * *	有效磷	56	0.405 * *	50	0.559 * *
有效铁	56	0.018	50	0.175	有效硫	56	0.791 * *	52	0.713 * *
有效钾	56	0.252	53	0.414 * *	有效硅	56	-0.414 * *	53	-0.342 *
有效锰	56	0.544 * *	52	0.637 * *	有效锌	56	0.674 * *	54	0.335 *
有效钼	56	0.657 * *	51	0.603 * *	/	/	/	/	/

注: \* \* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

部分有效 N,因此龙海市缺乏有机质地区在增施有机肥的同时需适量补充氮肥。

前文已提过,土壤中营养元素有效量不仅与其全量有关,还与土壤理化性质关系密切。随机抽取 48 件土壤样品,将所有影响因素作为自变量,采取线性模型,应用逐步多元回归分析,建立回归方程作为预测模型,该方程采用的因子均与元素有效量呈显著相关性,舍弃其他相关性较差或没有显著性的因子(表 10)。使用剩余 8 件样品进行效果验证(公式 1),误差统计见表 11。

$$RE = |(P_i - C_{\pm}) / P_i| * 100\% \text{ (公式 1)}$$

式中, $P_i$ 为土壤营养元素有效量实测值, $C_{\pm}$ 为预测值,取其平均值与中值验证预测模型的精确度。拟合结果显示,多数营养元素有效量的预测模

型中多元相关系数  $R$  值均达显著相关水平,且除 B、S 外,其他元素有效量经过多元拟合效果比单因素拟合效果更好,其中有效 Si、有效 Cu、有效 Zn 含量预测模型  $R$  值均大于 0.8,表明其有效量影响因子较多且相关性较好。如果预测模型中可以加入更多的影响因子,则可能提高模型的拟合效果,使预测结果更精准、更有说服力。

经过误差验证(表 11)后发现,所有预测模型的误差均值都在 33% 以下,最小值为有效 Si(14.36%),最大值为有效 B(32.39%),有效 Si、有效 Cu、有效 S、有效 Zn 预测误差均值均在 20% 以内,预测效果较好,精度也较高,可以为龙海市的表层土壤元素有效量预测,区内营养元素的丰缺评价、施肥管理等方面提供有益依据。

表 9 元素有效度与土壤理化指标参数相关系数

Table 9 Correlation coefficients between elemental effectiveness and soil physical and chemical index parameters

指标	pH	CEC	SOM	指标	pH	CEC	SOM
有效 B	-0.245	-0.103	-0.207	有效 N	-0.130	0.179	-0.301 *
有效 Cu	0.051	-0.123	0.284 *	有效 P	-0.256	0.225	0.277 *
有效 Fe	0.065	-0.084	0.297 *	有效 S	-0.226	0.239	0.203
有效 K	0.349 * *	0.148	0.056	有效 Si	0.420 * *	0.741 * *	0.109
有效 Mn	0.137	-0.021	0.330 *	有效 Zn	0.206	-0.165	0.393 * *
有效 Mo	0.265 *	0.071	0.219	/	/	/	/

注: \* \* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

表 10 表层土壤营养元素有效态与全量及理化指标的线性关系

Table 10 Linear relationship between the effective state of nutrient elements in the surface soil and the full amount and physicochemical indexes

指标	线性回归方程	$R$ *
有效 B	$y=0.003x_1 + 0.512$	0.306
有效 Cu	$y=4.327+0.340x_1+0.218x_2+0.111x_3+0.004x_4$	0.896
有效 Fe	$y=-0.045-0.02x_1+0.008x_2+0.017x_3$	0.519
有效 K	$y=-0.936+0.013x_1+0.222x_2+0.011x_3-0.45x_4$	0.470
有效 Mn	$y=-54.152+0.075x_1+11.734x_2-0.262x_3+15.669x_4$	0.617
有效 Mo	$y=-0.677+0.101x_1+0.112x_2+0.095x_4$	0.755
有效 N	$y=127.948+0.067x_1-18.046x_2+3.154x_3-28.105x_4$	0.572
有效 P	$y=436.4+0.065x_1-74.738x_2-0.670x_3+6.783x_4$	0.557
有效 S	$y=2.792+0.193x_1-3.104x_2+0.667x_3-4.185x_4$	0.799
有效 Si	$y=-0.028+0.009x_2+0.001x_3-0.001x_4$	0.924
有效 Zn	$y=-40.956+0.274x_1+3.065x_2-0.842x_3+11.521x_4$	0.802

注:元素有效量单位为  $10^{-6}$ ;  $x_1$  为指标对应的元素全量(Fe、K、Si 为%,其余为  $10^{-6}$ );  $x_2$  为 pH 值(无量纲);  $x_3$  为阳离子交换量( $10^{-6}$ );  $x_4$  为有机质含量(%)

表 11 预测模型误差统计

Table 11 Statistics of prediction model errors

预测模型参数	误差范围/%	误差均值/%
有效 B	19.09~47.76	32.39
有效 Cu	10.78~25.95	18.25
有效 Fe	13.06~45.87	31.39
有效 K	21.09~38.35	30.63
有效 Mn	22.46~35.68	29.31
有效 Mo	15.16~28.62	23.74
有效 N	21.36~32.95	26.78
有效 P	19.36~30.48	25.43
有效 S	12.38~27.66	19.73
有效 Si	9.34~21.58	14.36
有效 Zn	14.33~26.94	19.69

### 3 结 论

(1)通过对福建龙海市全区土壤理化性质的等级划分与营养元素含量特征研究,龙海市表层土壤整体呈酸性-强酸性,有机质含量中等偏缺乏,阳离子交换量整体偏低,N、P、K、Mo及Zn相对富集,Ca、Mg、Mn、Cu、B相对贫乏。

(2)龙海市表层土壤中B、Cu、K、Mn、Mo、N、P、S、Zn等元素是其有效量的主要影响因素;在龙海市范围内,土壤酸碱度对K、Mo和Si有效度有显著影响,阳离子交换量对Si有效度有显著影响,有机质对Cu、Fe、Mn、N、P和Zn有显著影响。

(3)使用线性模型,将土壤中营养元素总量、土壤酸碱度、阳离子交换量、有机质等作为变量进行多元回归分析得到的有效量预测模型误差较小,可以预测龙海市表层土壤中Cu、Fe、Mo、Mo、P、S、Si等营养元素有效量。

### 参考文献

迟清华,鄢奇才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社,2007:1-148.

丁文广,魏银丽,杨军梅,等.甘肃省中部干旱区植被恢复对土壤养分变化的影响研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(1):159-163.

董岩翔,郑文.浙江省北部地区土壤元素有效量研究[J].贵州地质,2005,(3):23-28.

范宏迪,付文进,对三汗,等.博乐垦区土壤阳离子交换量水平分析与施肥建议[J].新疆农业科技,2011,(3):53.

姜冰,王松涛,孙增兵,等.山东省青州市土壤养分元素有效量及其影响因素[J].土壤,2021,53(6):1221-1227.

姜冰,王松涛,孙增兵,等.潍坊市土壤大量营养元素有效量及其影响因素[J].土壤,2023,55(1):218-223.

李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,2001.

李杨,李明辉.岳西—太湖地区土壤酸碱度分布特征及变化趋势[J].资源环境与工程,2020,34(3):363-365,431.

刘蓉,邓茂,李莹莹,等.不同酸碱度土壤阳离子交换量的测定研究[J].中国环境监测,2020,36(1):125-130.

刘银飞,孙彬彬,贺灵,等.福建龙海土壤垂直剖面元素分布特征[J].物探与化探,2016,40(4):713-721.

骆珊,张德明,卢定彪,等.乌蒙山区毕节市耕地土壤微量元素丰缺评价及其影响因素[J].地质通报,2021,40(9):1570-1583.

全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992:1-243.

陶睿.重庆市丰都县紫色土养分空间变异及土壤肥力评价[J].土壤通报,2017,49(1):155-161.

韦世勇.广西桂平市土壤中元素的有效态研究[J].矿产与地质,2017,31(3):564-569,579.

武钦萍,张廷元,张洋,等.神府矿区复垦土地土壤微量元素有效性影响因素研究[J].水土保持研究,2012,19(5):153-157.

谢国雄,胡康赢,王忠,等.耕地土壤有机质提升的几点思考[J].江西农业学报,2020,32(4):78-83.

徐宏林,付豪,叶岛,等.仙桃市西南部耕层土壤中养分元素有效量和有效度研究[J].资源环境与工程,2017,31(3):278-283.

严明书,吴春梅,蒙丽,等.重庆市黔江猕猴桃果园土壤养分状况分析[J].物探与化探,2019,43(5):1123-1130.

杨秀珍,吴迪,秦樊鑫,等.贵州典型铅锌矿区土壤阳离子交换量水平分析与施肥建议[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2012,30(6):29-32.

叶家瑜,江宝林.区域地球化学勘查样品分析方法[M].北京:地质出版社,2004:1-416.

尹春艳,李彬,黄斌,等.鄂尔多斯高原农田土壤类型与养分组成对微量元素的影响——以鄂托克旗为例[J].中国水土保持,2020,(5):40-43.

臧惠林,张效朴,何电源.我国南方水稻土供硅能力的研究[J].土壤学报,1982,(2):131-140.

张华国.西藏青稞粮食主产区土壤养分状况分析评价研究[J].肥料与健康,2020,47(1):17-20,71.

赵送来,宋照亮,姜培坤,等.西天目集约经营雷竹林土壤硅存在形态与植物有效性研究[J].土壤学报,2012,49(2):331-338.

中国地质调查局.生态地球化学评价样品分析技术要求(DD2005—03)[S].2005.

中国地质调查局.多目标区域地球化学调查规范(DD2005—01)[S].2005.

中华人民共和国国土资源部.土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295—2016)[M].北京:地质出版社,2016.

周国华,孙彬彬,方金梅.福建龙海生态地球化学研究[M].北京:地质出版社,2018:169.