

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.027

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. 土壤, 2023, 55(1): 218–223.

潍坊市土壤大量营养元素有效量及其影响因素^①

姜冰^{1,2}, 王松涛^{1*}, 孙增兵¹, 张德明¹, 王建¹

(1 山东省第四地质矿产勘查院, 山东潍坊 261021; 2 山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室, 山东潍坊 261021)

摘要: 为研究山东省潍坊市土壤大量营养元素有效量分布规律及其影响因素, 通过网格化采样, 并进行分析测试, 获得了碱解氮、有效磷、速效钾等土壤大量营养元素有效量, 及对应元素全量、pH 和有机质等数据, 进行了丰缺空间绘图、相关性和差异性分析。结果表明: 碱解氮、有效磷、速效钾含量均具有较强的空间变异性, 尤以有效磷变异系数最高。空间分布上, 碱解氮以较缺乏区占比最高, 有效磷和速效钾以丰富区占比最高。碱解氮、有效磷、速效钾分别在砂姜黑土、潮土、滨海盐土中含量最高, 且均与其他土壤类型差异显著。碱解氮、有效磷、速效钾与土壤理化指标关系密切, 3 种元素有效量均与有机质呈显著正相关; 碱解氮与全氮、有效磷与全磷均呈显著正相关; 碱解氮、有效磷与土壤 pH 均呈显著负相关; 速效钾与土壤 pH 呈显著正相关。本研究揭示了大量营养元素有效量在土壤中的本底差异及影响因素, 可为土壤肥力的空间调控提供科学依据, 助力提升农业生产水平。

关键词: 土壤; 大量营养元素; 有效量; 影响因素; 潍坊市

中图分类号: S151.9 **文献标志码:** A

Available Contents of Soil Macronutrients and Their Influencing Factors in Weifang

JIANG Bing^{1,2}, WANG Songtao^{1*}, SUN Zengbing¹, ZHANG Deming¹, WANG Jian¹

(1 Shandong Provincial No.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang, Shandong 261021, China; 2 Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection, Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Weifang, Shandong 261021, China)

Abstract: In order to study the distribution and influential factors of available contents of soil macronutrients in Weifang City, Shandong Province, the grid sampling and analysis test were carried out. The total and available contents of soil macronutrients such as N, P and K, as well as pH and organic matter were measured. The spatial maps of abundance and deficiency in these soil indexes were drawn, and their correlation and difference were analyzed. The results show that the contents of alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) have strong spatial variability, especially variation coefficient of AP is the highest. In terms of spatial distribution, the relatively lack area of AN has the highest proportion, and the rich areas of AP and AK have the highest proportions. AN content is significantly higher in Shajiang black soil, AP content is significantly higher in fluvo-aquic soil, while AK content is significantly higher in coastal saline soil. AN, AP and AK are closely related to soil physiochemical indexes, which are significantly positively correlated with organic matter. There is significant positive correlation between AN and total nitrogen, AP and total phosphorus. AN and AP are significantly negatively correlated with pH, while AK is significantly positively correlated with pH. These results reveal the background difference and influencing factors of available contents of soil macronutrients, which can guide the spatial regulation of soil fertility and help to improve the level of agricultural productivity.

Key words: Soil; Macronutrients; Available content; Influencing factors; Weifang City

土壤中的大量营养元素氮、磷、钾, 在植物生长过程中具有重要作用, 是植物需要最多的元素, 也是作物收获后从土壤中带走最多的元素^[1-3], 需要通过施肥来加以补充, 因此被称为“肥料三要素”^[4]。土

①基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查引领示范和科技创新项目(KC201903, 202005, KC202207)资助。

* 通讯作者(sdwfwt@163.com)

作者简介: 姜冰(1984—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境地球化学研究。E-mail: jbing08@163.com

壤元素有效量可被作物直接吸收利用,与元素总量相比,有效量能够更有效地反映植物营养元素的供给能力,是衡量土壤养分容量和强度水平的重要指标,而其又受多种因素的影响。武钦萍等^[5]研究发现神府矿区复垦土地中铜、铁、锰、锌等元素有效量与土壤 pH 呈负相关,与有机质呈正相关。姜冰等^[6]研究发现青州市土壤中氮、磷、钾及其他养分元素有效量主要受控于元素全量、土壤 pH、有机质、地质背景、土壤类型等。马大龙等^[2]研究了临汾市尧都农业区氮、磷、钾等营养元素有效量的空间变异特征,并提出了施肥建议。丁文广等^[7]通过对甘肃省中部干旱区不同退耕年限的土壤养分进行相关分析,发现有机质、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。刘世全等^[8-9]认为西藏土壤碱解氮与全氮、有机质呈非线性正相关,有效磷与有机质显著正相关,与全磷的相关性包含了有机质因素的影响,土壤 pH 为 6.4~7.3 的土壤有效磷含量较高,速效钾主要受控于阳离子交换量。通过研读文献可知,小尺度的研究区域相对较小,研究成果难以有代表性;大尺度的研究区域覆盖范围广,但多数研究样本量不多,自然环境变化引起的数据变化可能对结果产生较大影响。本研究基于大样本调查数据,旨在为潍坊地区土壤大量营养元素有效量本底特征统计及其影响因素分析提供真实可靠的数据基础。

山东省潍坊市作为传统农业大市,素有“全国农业看山东、山东农业看潍坊”美誉,农业生产水平维持受土壤各项指标协调的综合影响,而土壤速效养分含量和产量关系最为密切^[10-11]。本研究利用网格化采样分析测试、绘制分级空间分布图、相关分析、差异性分析等方法,揭示潍坊市表层土壤大量营养元素的空间变异规律,掌握其分布状况,探讨其影响因素,以期为土壤资源的可持续利用和管理、土壤培肥与改良提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

潍坊市地处 118°10'E ~ 120°01'E、35°41'N ~ 37°26'N,位于山东半岛中部,泰沂山北麓,胶东半岛与鲁中腹地的过渡带,面积 16 167 km²,其中农用地占 71.2%,建设用地占 19.6%,未利用地占 9.2%。气候属温带季风气候,四季分明,春季风多雨少,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干旱。地势总体南高北低,南部为中低山、丘陵,海拔 100 m 以上,占 35.6%;中部为倾斜平原,海拔 7~100 m,坡降

1/500 ~ 1/1 200,占 41.6%;北部沿海为滨海平原,海拔 7 m 以下,占 22.8%。土壤类型含棕壤、褐土、粗骨土、砂姜黑土、潮土、滨海盐土等 6 类(图 1),其受生物气候条件影响,又受到地形地貌、水文地质、母岩母质的综合影响和制约,而各种条件的差异,使潍坊市土壤分布有较鲜明的规律,自南向北总体依次分布粗骨土→棕壤→褐土→潮土→砂姜黑土→滨海盐土。

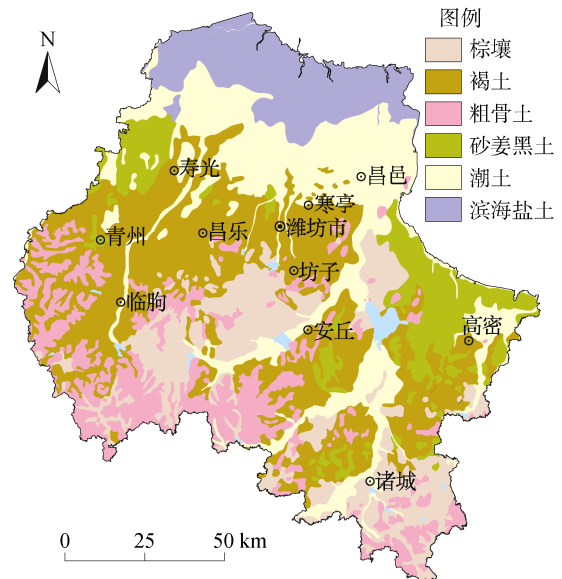


图 1 研究区土壤类型

1.2 样品采集

以 2 km × 2 km 尺度划定网格,城镇地区适当放稀,布设样点于网格内主要土壤类型和主要土地利用方式的代表性地块,采集介质为 0~20 cm 表层土壤,以样点为中心,在周边 50~100 m 范围内,采用“S”形或“X”形设定分样点进行多点采集,各分样点的采样部位、深度和重量一致,并剔除植物根系、石块等杂物,由 4~6 个分样等量混合组成 1 件样品,充分混匀,四分法缩分不少于 1 kg 装入干净棉布袋,放置通风阴凉处自然风干后移交山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室进行处理与测试,本次工作实际共采集土壤样品 3 474 件。

1.3 样品处理与测试

参照 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[12],风干样品经木棒敲碎后全部过 2 mm 孔径尼龙筛,混匀后四分法分成若干份,一份供测土壤 pH、有效磷、速效钾、碱解氮,一份过 0.25 mm 孔径尼龙筛供测有机质、全氮,一份过 0.074 mm 孔径尼龙筛供测全磷、全钾。土壤 pH 经水浸提(水土

比为 2.5 : 1, $V : m$), 采用电位法测定^[13]; 有机质经油浴加热, 采用重铬酸钾氧化法测定^[14]; 全氮经硫酸消煮, 采用凯氏定氮法测定, 碱解氮采用氢氧化钠碱解扩散法测定^[15]; 全磷经氢氧化钠熔融, 采用钼锑抗比色法测定, 速效磷经碳酸氢钠浸提, 采用电感耦合等离子体发射光谱法测定^[16]; 全钾经氢氧化钠熔融, 采用原子吸收分光光度法测定, 速效钾经乙酸铵浸提, 采用电感耦合等离子体发射光谱法测定^[17]。样品检出率均为 100%, 用国家一级标准物质(GBW 系列)检验分析方法准确度和精密度, 合格率均为 100%, pH 绝对偏差小于 0.1, 测试结果和数据质量满足要求。

1.4 数据处理

受自然条件突变的影响, 测试数据中可能存在偏离较大的异常值, 其不具代表性, 且会对数据分析造成不利影响^[18]。采用 Microsoft Excel 2010 软件, 利用正态分布的 3σ 原则对指标值进行筛选, 剔除异常值, 然后进行描述性统计。统计土壤 pH 先换算 $[H^+]$ 浓度, 再剔除异常值, 最后换算成 pH。采用 SPSS 22.0 软件进行双尾显著性检验和 Pearson 相关性分析, 将剔除异常值后形成的缺失值及与缺失值有检验分析关系的观测值成对排除。采用 MapGIS 软件数字地面模型(digital terrain model, DTM)分析, 生成不规则三角网(triangulated irregular network, TIN), 根据分级标准绘制空间分布等值线图。

2 结果与分析

2.1 土壤指标描述性统计

研究区剔除异常值后的土壤大量营养元素全量、有效量和理化指标统计参数如表 1 所示。变异系数反映数据的离散程度, 其达到中等变异强度, 即 0.1 ~ 1, 表明土壤元素或指标含量具有一定的空间分布差异性^[19-20]。变异程度大小依次为: 有效磷>速效钾>碱

解氮>全磷=有机质>全氮>全钾>土壤 pH, 显然, 有效量具有更强的空间变异性。以 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[12]中土壤养分指标等级划分标准的中等和土壤 pH 中性的下限值为临界值, 来衡量研究区各指标的丰缺或土壤酸碱度水平。全氮和有机质的均值低于临界值, 其他指标均高于临界值, 尤以有效磷最为突出, 达临界值的 4 倍以上。而有效磷的变异系数为 0.97, 空间变异性最强, 表明局部存在磷肥的过量施用, 可能导致肥料利用率低和水体富营养化等环境风险^[21-22], 应引起重视。土壤 pH 均值在中性范围内。

2.2 土壤大量营养元素有效量丰缺评价

基于 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[12], 将土壤大量营养元素有效量划分为 5 个等级进行统计(表 2), 并绘制空间分布图, 其区域分布特征受含量差异的影响。碱解氮较缺乏样本数 1 200 个, 占比最高, 达 34.54%; 缺乏的样本数 692 个, 占比 19.92%, 虽然其均值略高于临界值, 但含量差异较显著。由图 2 可见, 碱解氮缺乏区主要集中于北部沿海、寒亭至安丘一带以及临朐南部, 有较强的地域性; 丰富区则呈点源状无规律分布, 可能受施肥等农业生产行为的影响。有效磷以丰富为主, 样本数 1 446 个, 占比 41.62%; 较缺乏和缺乏的样本数最少, 分别占比 10.79%和 9.38%。由图 3 可见, 有效磷缺乏区主要分布于坊子至北部沿海一带、青州西部以及临朐西南部; 丰富区集中连片分布, 空间分布差异显著。速效钾以丰富为主, 样本数 1 230 个, 占比 35.41%; 缺乏的样本数最少, 占比仅 3.11%。由图 4 可见, 速效钾总体呈现南低北高的分布趋势, 与自南向北的土壤类型分布规律有一定契合, 表明其受土壤性质影响较大, 另外可能与南部低山丘陵区不发达的农业生产水平也有一定关系。

表 1 剔除异常值后各指标的描述性统计

指标	异常数	统计数	平均值	标准差	变异系数	临界值 ^[12]
碱解氮(mg/kg)	$n = 51$	$n = 3\ 423$	94.44	47.43	0.50	90
有效磷(mg/kg)	$n = 64$	$n = 3\ 410$	43.69	42.38	0.97	10
速效钾(mg/kg)	$n = 41$	$n = 3\ 434$	192.50	127.52	0.66	100
全氮(g/kg)	$n = 47$	$n = 3\ 427$	0.96	0.38	0.40	1
全磷(g/kg)	$n = 32$	$n = 3\ 442$	0.90	0.41	0.45	0.6
全钾(g/kg)	$n = 78$	$n = 3\ 396$	19.72	2.72	0.14	15
pH	$n = 75$	$n = 3\ 399$	7.28	0.98	0.13	6.5
有机质(g/kg)	$n = 64$	$n = 3\ 410$	15.07	6.74	0.45	20

表 2 土壤大量营养元素有效量分级统计

指标	项目	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏
碱解氮	分级标准(mg/kg)	>150	120 ~ 150	90 ~ 120	60 ~ 90	≤60
	样本数	n = 434	n = 308	n = 840	n = 1 200	n = 692
	占比(%)	12.49	8.87	24.18	34.54	19.92
有效磷	分级标准(mg/kg)	>40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	≤5
	样本数	n = 1 446	n = 784	n = 543	n = 375	n = 326
	占比(%)	41.62	22.57	15.63	10.79	9.38
速效钾	分级标准(mg/kg)	>200	150 ~ 200	100 ~ 150	50 ~ 100	≤50
	样本数	n = 1 230	n = 653	n = 782	n = 701	n = 108
	占比(%)	35.41	18.80	22.51	20.18	3.11

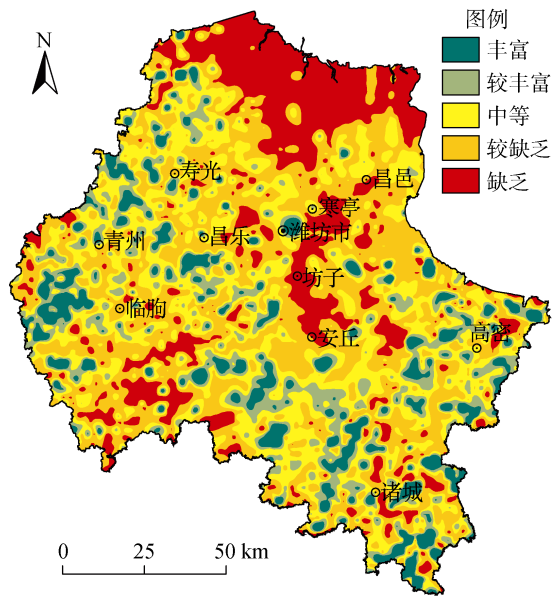


图 2 碱解氮分级空间分布

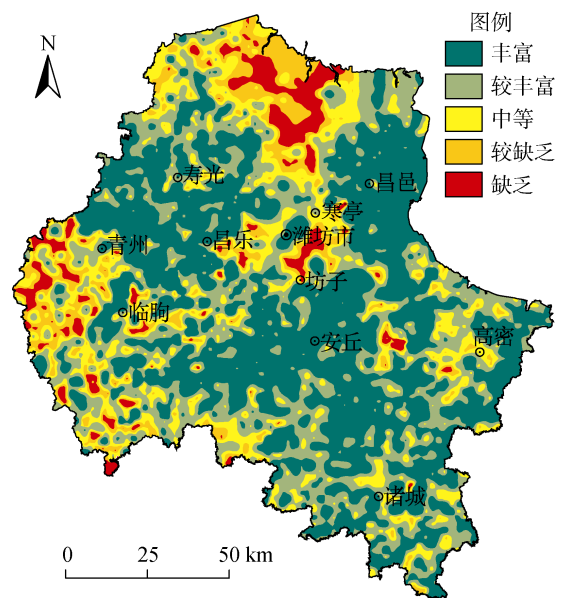


图 3 有效磷分级空间分布

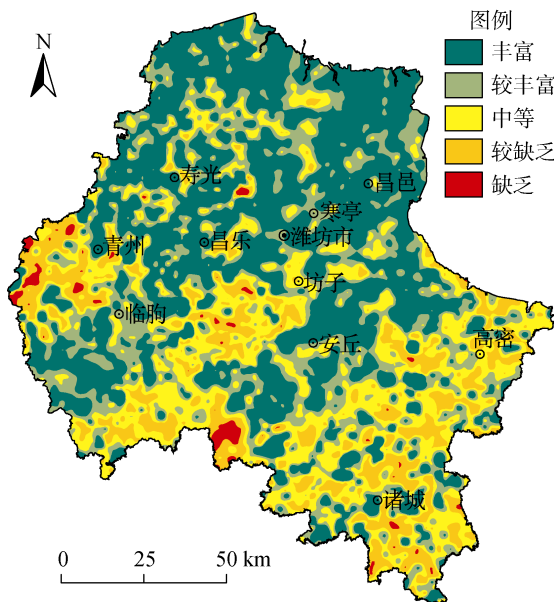


图 4 速效钾分级空间分布

2.3 土壤大量营养元素有效量的影响因素分析

2.3.1 土壤类型 土壤大量营养元素有效量和理化指标在不同土壤类型中的对比统计如表 3 所示。不同土壤类型的成土条件和成土过程各不相同,理化性质也有所差异,会对土壤元素地球化学行为产生影响。棕壤经受了比较强烈的淋溶作用和黏化作用,可溶盐和盐基成分已经基本被淋失,一般呈酸性或微酸性,其土壤 pH 显著低于其他土壤类型。粗骨土土层浅薄,经受侵蚀,发育程度弱,盐类易随地表水向低处迁移,其速效钾含量显著低于其他土壤类型。砂姜黑土是古老的耕作土壤,质地黏重,受旱耕熟化和人为影响(耕作、施肥),其碱解氮、有机质含量显著高于其他土壤类型。潮土在自然条件下,其磷素水平通常较低,但在现今农业生产条件下,管理措施已大幅改善,潮土区施用磷肥非常普遍^[23],故其有效磷含

表 3 不同土壤类型大量营养元素有效量、pH 和有机质含量

指标	项目	棕壤	褐土	粗骨土	砂姜黑土	潮土	滨海盐土
碱解氮	样本数	$n = 582$	$n = 1\ 066$	$n = 452$	$n = 372$	$n = 762$	$n = 189$
	含量(mg/kg)	$91.84 \pm 43.14\ c$	$100.45 \pm 47.50\ b$	$97.01 \pm 53.07\ bc$	$107.46 \pm 46.93\ a$	$90.95 \pm 42.41\ c$	$50.92 \pm 39.03\ d$
有效磷	样本数	$n = 593$	$n = 1\ 058$	$n = 464$	$n = 368$	$n = 736$	$n = 191$
	含量(mg/kg)	$47.70 \pm 41.15\ b$	$46.12 \pm 42.53\ b$	$27.33 \pm 31.61\ c$	$43.25 \pm 38.87\ b$	$55.24 \pm 48.61\ a$	$13.84 \pm 16.08\ d$
速效钾	样本数	$n = 595$	$n = 1\ 059$	$n = 464$	$n = 371$	$n = 755$	$n = 189$
	含量(mg/kg)	$160.20 \pm 112.44\ d$	$199.60 \pm 137.60\ c$	$147.97 \pm 97.58\ d$	$190.12 \pm 115.82\ c$	$218.46 \pm 126.45\ b$	$264.66 \pm 141.61\ a$
pH	样本数	$n = 559$	$n = 1\ 069$	$n = 445$	$n = 376$	$n = 759$	$n = 191$
	数值	$6.43 \pm 0.80\ f$	$7.35 \pm 0.85\ d$	$6.95 \pm 1.05\ e$	$7.65 \pm 0.77\ b$	$7.51 \pm 0.85\ c$	$8.46 \pm 0.45\ a$
有机质	样本数	$n = 592$	$n = 1\ 058$	$n = 436$	$n = 376$	$n = 761$	$n = 187$
	含量(g/kg)	$13.72 \pm 6.49\ d$	$16.33 \pm 6.60\ b$	$14.82 \pm 7.78\ c$	$17.81 \pm 5.24\ a$	$14.92 \pm 5.89\ c$	$7.80 \pm 5.48\ e$

注：表中指标含量及 pH 数值表示为均值±标准差；同行不同小写字母表示不同土壤类型间差异显著($P < 0.05$)。

量显著高于其他土壤类型。滨海盐土养分含量低、盐分含量高，呈碱性或微碱性反应，较难利用，其碱解氮、有效磷、有机质含量显著低于其他土壤类型，而速效钾含量和土壤 pH 显著高于其他土壤类型。

2.3.2 土壤元素全量和理化指标 土壤元素有效量通常受到多种土壤因子的制约，如对应元素全量、土壤 pH 和有机质等^[24]。剔除异常值后形成的缺失值按对排除个案，进行相关性分析。由表 4 可知，全氮和碱解氮相关系数 $r=0.577$ ($n=3\ 387$, $P < 0.01$)，全磷和有效磷相关系数 $r=0.466$ ($n=3\ 393$, $P < 0.01$)，表明碱解氮和有效磷受全量的影响显著，其有效量随全量的增加而增加。而全钾和速效钾相关性不显著，也有研究表明全钾与速效钾相关性小^[25]。土壤中的钾主要以矿物态钾存在于土壤粗粒部分，占全钾的 90% 以上，短期内不能被植物利用，各种形态的钾保持着动态平衡，速效钾一般不足全钾的 2%。有机质与碱解氮、有效磷、速效钾的相关系数分别为 0.503 ($n=3\ 369$, $P < 0.01$)、0.203 ($n=3\ 349$, $P < 0.01$)、0.262 ($n=3\ 374$, $P < 0.01$)，均达到显著正相关。碱解氮包括无机的矿物态氮和有机态氮，有机质中富磷，腐解产生的有机酸能活化被土壤固定的磷素，同时有机质中的钾在有机质分解后进入土壤溶液，参与不同形态钾的平衡体系，土壤有机胶体还会吸附钾离子。因此，对耕种土壤来说，保持和提高土壤有机质含量是培肥的中心环节^[26]。土壤 pH 与碱解氮、有效磷为显著负相关，相关系数分别为 -0.147 ($n=3\ 353$, $P < 0.01$)、 -0.279 ($n=3\ 335$, $P < 0.01$)，与速效钾为显著正相关，相关系数 $r=0.137$ ($n=3\ 358$, $P < 0.01$)。土壤酸碱性通过影响矿质盐分的溶解度而影响养分的有效性，同时制约着微生物活动，对有机质的腐殖质化和矿化过程有重要影响^[27]。土壤氮素的矿化速率由微生物控制，硝化作用在中性和微酸性最适宜，有机质分解过程中

产生腐殖质酸又会使土壤酸度增高。土壤在中性和微酸性环境下，磷酸盐的有效性最大^[28]，对磷矿粉而言，一般说来土壤 pH 越低，其有效性越高。土壤胶体负电荷随 pH 的提高而增加，对钾的吸附量也随之增加，同时在土壤 pH 低的情况下，速效钾向溶液中释放得较多。

表 4 土壤大量营养元素有效量与全量、pH 和有机质含量的相关性

	对应元素全量	有机质	土壤 pH
碱解氮	0.577**	0.503**	-0.147**
有效磷	0.466**	0.203**	-0.279**
速效钾	0.002	0.262**	0.137**

注：**表示相关性达 $P < 0.01$ 显著水平。

3 结论

1) 研究区表层土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量具有很强的空间变异性，平均值分别为 94.44、43.69、192.50 mg/kg；碱解氮以较缺乏占比最高，有效磷和速效钾以丰富占比最高。

2) 不同土壤类型理化指标有所差异，对元素有效量形成了差异性影响。粗骨土中速效钾含量显著低于其他土壤类型；砂姜黑土中碱解氮含量显著高于其他土壤类型；潮土中有效磷含量显著高于其他土壤类型；滨海盐土中碱解氮、有效磷显著低于其他土壤类型；速效钾含量显著高于其他土壤类型。

3) 土壤大量营养元素有效量受元素全量、土壤 pH 和有机质等多种土壤因子的影响。碱解氮与全氮、有效磷与全磷均呈显著正相关，碱解氮、有效磷、速效钾与有机质均呈显著正相关，碱解氮、有效磷与土壤 pH 呈显著负相关，速效钾与土壤 pH 呈显著正相关。

参考文献：

- [1] 龚雪蛟, 秦琳, 刘飞, 等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403-1416.
- [2] 马大龙, 张永清, 杜静静, 等. 临汾市尧都农业区土壤有机质和大量营养元素空间变异性研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(14): 6231-6234.
- [3] 林洪鑫, 袁展汽, 刘仁根, 等. 不同氮磷钾处理对木薯产量、养分积累、利用及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1457-1465.
- [4] 柴仲平, 王雪梅, 陈波浪, 等. 氮磷钾肥配施对香梨膨果期光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2013(17): 171-174.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 等. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 54-57, 67.
- [9] 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 等. 西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 75-78, 88.
- [10] 戴伊莎, 成欣, 刘帮艳, 等. 秸秆和紫云英协同覆盖对西南旱地土壤养分、酶活性及小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1339-1347.
- [11] 季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代 20% 化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 491-499.
- [12] 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] 中华人民共和国农业部. 土壤 PH 的测定: GB/T 12010.8—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [16] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 国家林业局. 森林土壤钾的测定: LY/T 1234—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 李炳钊. 概率统计[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.
- [19] Mallants D, Mohanty B P, Jacques D, et al. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile[J]. Soil Science, 1996, 161(3): 167-181.
- [20] 任频频, 黄峰, 李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 440-450.
- [21] 刘瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 558-567.
- [22] Lin C, Ma R H, Xiong J F. Can the watershed non-point phosphorus pollution be interpreted by critical soil properties? A new insight of different soil P states[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628/629: 870-881.
- [23] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459-467.
- [24] 江胜国, 詹华明, 刘广明, 等. 天津小站稻种植区土壤主要微量营养元素的有效量及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1215-1220.
- [25] 江胜国, 肖蒙, 刘广明, 等. 天津小站稻种植区土壤质量综合评价[J]. 土壤, 2022, 54(2): 371-378.
- [26] 崔增团, 郭世乾, 赵凡. 甘肃省土壤有机质提升技术模式对土壤耕层养分影响初探[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 134-142, 171.
- [27] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 等. 中度强度森林火灾对马尾松次生林土壤有机碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(10): 1073-1086.
- [28] 孙桂芳, 金继运, 王玲莉, 等. 低分子量有机酸类物质对红壤和黑土磷有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1426-1432.