

中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析

王子腾^{1, 2}, 耿元波^{1*}, 梁 涛¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤有效 Zn 含量是土壤整体营养状况的一个重要评价指标, 明确中国土壤有效 Zn 含量的时空分布特征, 针对缺锌的土壤类型和区域采取有效的补 Zn 措施, 可以实现微量营养元素的精准施肥。本研究以中国农业生态站监测点的数据为基础, 分析了土壤有效 Zn 含量的时空差异, 探讨了土壤类型、土地利用方式、土壤理化性质(有机质、pH 值、有效 N、有效 P、有效 K 与阳离子交换量-CEC)对土壤有效 Zn 含量时空变化的影响。结果显示, 中国土壤有效 Zn 含量整体上处于中等水平, 呈南高北低, 东高西低的分布趋势, 与全国范围内土壤 pH 值分布、干湿区划分及土壤类型地带性分布有很好的相关性; 在时间序列上, 从 2005 年到 2015 年, 土壤有效 Zn 含量呈上升趋势; 土壤类型及土地利用方式不同, 土壤有效 Zn 含量存在显著差异, 不同土类中, 水稻土和红壤的有效 Zn 含量较高, 土地利用方式中, 水田的土壤有效 Zn 含量最高; 土壤理化指标中, 土壤 pH 值和土壤有机质对土壤有效 Zn 含量有显著影响。风沙土、草甸风沙土、黄绵土等土类及水浇地和旱地等土地利用方式, 要注重 Zn 肥的补充, 并可通过土壤 pH 值的调整及施用农家肥等措施来提高土壤有效 Zn 含量。

关键词: 农田土壤; 有效 Zn; 时空差异; pH 值; 有机质

土壤中有效 Zn 指的是分别用二乙三胺五醋酸即 DTPA 和 0.1 mol/L 的 HCl 溶液来提取石灰性土壤和酸性土壤中的 Zn, 提取的量即为土壤有效态 Zn 的含量, 可以反映土壤的供 Zn 能力^[1], 其含量状况对植物的生长发育具有重要作用, 缺 Zn 会导致植物的叶绿体合成受阻, 光合速率下降^[2-3], 影响农作物的产量与品质^[4-5], 最终会对人类健康产生影响^[6-7]。例如, 缺 Zn 会导致处于生长发育期的儿童营养不良, 易患呆小症^[8-9]; 降低人体免疫力, 使人体更易患病^[10]; 削弱人体的抗氧化胁迫能力^[11]等。据报道, 中国约有 40% 的土壤缺 Zn^[1], 加上农户对 Zn 肥补施的关注度不高及农作物对土壤 Zn 的持续吸收, 打破了土壤 Zn 的输入与输出平衡, 加剧了土壤缺 Zn 的状况。土壤中有效 Zn 的含量受多种因素的影响, 例如土壤理化性质、成土母质、土壤类型和土地利用方式等^[12-14]。

目前有关土壤有效 Zn 含量及其影响因素的研究已有报告^[15-19], 但是研究区域比较小, 多集中

于某个地区、地级市、县级市或者是某个田间试验, 对全国范围内土壤有效 Zn 含量的分布及其影响因素的分析探讨还比较欠缺。本研究以国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统的 21 个农业生态站监测点的数据为基础, 系统分析了中国土壤有效 Zn 含量在全国范围内的分布及其在时间上的变化趋势, 整理归纳了不同土类及土地利用方式下土壤有效 Zn 含量差异。从而明确全国范围内土壤有效 Zn 含量的分布情况, 富 Zn 和缺 Zn 的土壤类型及土地利用方式, 不同土壤理化指标对土壤 Zn 有效性的影响, 最终为提高土壤有效 Zn 含量, 实现微量元素精准施肥, 提升农作物产量与品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

中国农田土壤有效 Zn 含量数据来自国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统的 21 个农业生态站监测点^[20], 分别为 2005 年、2010 年和 2015 年 3 个时间段。其中, 2005 年涵盖了 17 个农业生态站的土壤有效 Zn 含量数据(阿克苏站、环江站、千烟洲站和桃源站的数据缺失), 合计 86 个采样点, 除三江站和鹰潭站采用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液浸提之外, 其余站点均采用 DTPA 浸提; 2010

收稿日期: 2019-01-05; 录用日期: 2019-03-09

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFD0201208); 国家自然科学基金项目(41071138); 中科院战略性先导科技专项(XDA23100403)。

作者简介: 王子腾(1992-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 从事环境生物地球化学研究。E-mail: wangzt.16s@igsrr.ac.cn。

通讯作者: 耿元波, E-mail: gengyb@igsrr.ac.cn。

年涵盖了 20 个农业生态站的土壤有效 Zn 含量数据 (栾城站数据缺失), 合计 130 个采样点, 均采用的是 DTPA 浸提; 2015 年只涵盖了 4 个农业生

态站的数据 (包括策勒站、常熟站、拉萨站和三江站), 合计 22 个采样点, 均采用的是 DTPA 浸提。农业生态站的具体分布如图 1 所示。

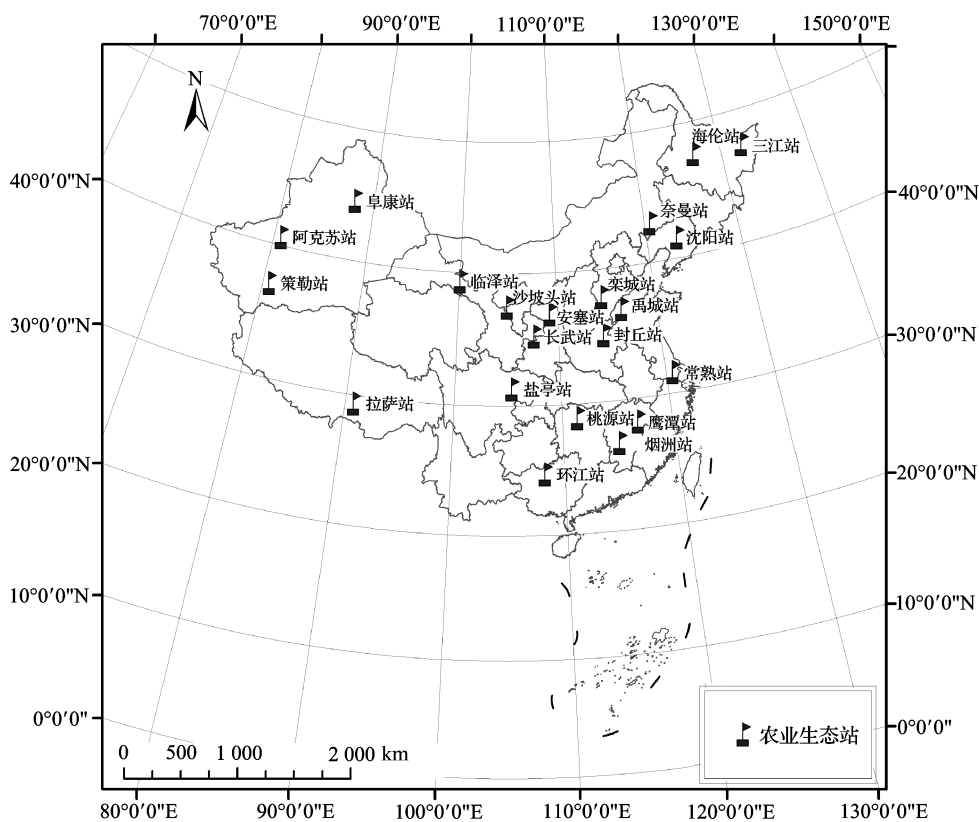


图 1 中国农业生态站分布图

注: 原始数据来自于国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统^[20]。

1.2 数据分析方法

将原始数据进行整理, 得到不同年份、不同采样点、不同生态站的平均土壤有效 Zn 含量, 依据不同的浸提方法分为 DTPA 浸提有效 Zn 和盐酸浸提有效 Zn; 把土壤有效 Zn 含量与相应的土壤理化指标 (包括土壤有机质、pH 值、有效氮、有效磷、有效钾和 CEC 等)、土类和土地利用方式等, 根据各采样点的样地编号一一对应, 分析其对土壤有效 Zn 含量的具体影响; 探讨不同土壤类型、不同土地利用方式下土壤有效 Zn 含量的差异情况, 分析不同因素对土壤有效 Zn 含量的影响差异; 基于农业生态站的经纬度坐标, 利用 Arc GIS 10.2 绘制农业生态站的分布图和 2010 年各农业生态站的土壤有效 Zn 含量图; 利用 OriginPro 2017 绘制相关图件, 相关的统计学分析利用 SPSS 21 来完成, 均值的比较通过单因素方差分析-LSD (L) 来进行 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有效 Zn 含量与理化指标的基本统计特征

2005 年, DTPA 浸提有效 Zn 和盐酸浸提有效 Zn 的平均值分别为 0.96 和 1.69 mg/kg; 2010 年, DTPA 浸提有效 Zn 的平均值为 1.64 mg/kg; 2015 年, DTPA 浸提有效 Zn 的平均值为 2.03 mg/kg, 具体如表 1 所示。根据土壤有效 Zn 含量分级标准 (表 2)^[1], 2005 年的土壤有效 Zn 含量大部分处于低水平, 三江站和鹰潭站 (0.1 mol/L 的盐酸浸提) 处于中等水平; 2010 年的土壤有效 Zn 含量整体上处于中等水平; 2015 年位于高水平, 但是其含量刚刚超过 2 mg/kg, 并且样本量较少, 难以反映中国的整体情况。根据变异系数的大小, 可以粗略预测变量的变异程度, 变异系数 $<10\%$ 时为弱变异性, $>100\%$ 时为强变异性^[21-23]; 农田土壤有效 Zn 均位于中等程度变异。

表 1 土壤有效锌及理化指标统计值

年份	样本数目	指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数 (%)
2005	76	DTPA 浸提有效 Zn (mg/kg)	0.11	2.98	0.96	0.60	62.5
	10	盐酸浸提有效 Zn (mg/kg)	0.74	2.84	1.69	0.74	43.8
	86	有机质 (g/kg)	2.13	48.00	15.01	9.65	64.3
	86	pH 值	4.68	9.01	7.57	1.24	16.4
	86	有效 N (mg/kg)	14.73	277.20	75.46	48.66	64.5
	86	有效 P (mg/kg)	2.06	44.25	15.56	9.97	64.1
	86	有效 K (mg/kg)	38.52	271.79	117.17	44.65	38.1
	86	阳离子交换量 (cmol/kg)	1.53	49.77	14.67	11.07	75.5
2010	130	DTPA 浸提有效 Zn (mg/kg)	0.34	7.27	1.64	1.16	70.7
		有机质 (g/kg)	2.37	74.29	21.05	13.25	62.9
		pH 值	4.19	9.14	7.07	1.51	21.4
		有效 N (mg/kg)	15.35	249.12	93.81	56.82	60.6
		有效 P (mg/kg)	0.97	108.87	22.53	20.59	91.4
		有效 K (mg/kg)	13.92	392.63	110.33	66.85	60.6
		阳离子交换量 (cmol/kg)	1.88	44.85	13.20	8.20	62.1
2015	22	DTPA 浸提有效 Zn (mg/kg)	0.53	4.15	2.03	1.12	55.2
		有机质 (g/kg)	2.39	48.48	25.72	14.98	58.2
		pH 值	5.05	8.52	6.87	0.84	12.2
		有效 N (mg/kg)	19.96	343.84	105.79	106.02	100.2
		有效 P (mg/kg)	2.05	84.07	39.07	27.23	69.7
		有效 K (mg/kg)	33.37	230.21	110.20	63.52	57.6
		阳离子交换量 (cmol/kg)	2.18	41.32	12.82	10.56	82.4

表 2 土壤有效 Zn 含量分级标准^[1]

等级	极低	低	中等	高	极高
DTPA 浸提有效 Zn (mg/kg)	<0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 5.0	>5.0
盐酸浸提有效 Zn (mg/kg)	<1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 5.0	>5.0

2.2 各农业生态站土壤有效 Zn 含量的变化

根据 2010 年各农业生态站的平均土壤有效 Zn 含量及其地理位置绘制了全国范围内各农业生态站的平均土壤有效 Zn 含量分布图 (图 2)。从全国范围看,整体上呈南高北低东高西低的一个分布趋势,不仅与全国土壤南酸北碱的分布趋势具有很高的相关性,与全国土壤从东南沿海向西北的干湿区划分也是紧密联系的。从不同年代来看,2005 ~ 2015 年,其土壤有效 Zn 含量是逐渐升高的,这一点从表 1 中可以看出。但是 2015 年只有 4 个农业生态站的值,笼统地进行比较不具说服力,而策勒站、拉萨站、常熟站和三江站在这 3 个时间段的数据均比较齐全,因此可以将其单独拿出来进行分析

(图 3)。其中,拉萨站的土壤有效 Zn 含量,2015 年显著高于 2010 年和 2005 年,土壤有效 Zn 含量在 2005 年和 2010 年处于中等水平,在 2015 年处于 2.0 ~ 5.0 mg/kg 的高水平区间;三江站在 2005 年采用的是 0.1 mol/L 的盐酸浸提,会提高土壤有效 Zn 的含量值,但在 3 个年份中,2005 年仍然是最低的,处于低水平,稍低于 2010 年,显著低于 2015 年,并且 2015 年土壤的有效 Zn 含量达到了高水平;策勒站在 2015 年和 2010 年之间未达到显著差异,但是 2010 年和 2015 年的土壤有效 Zn 含量显著高于 2005 年,土壤有效 Zn 含量由 2005 年的极低变为低水平,且 2015 年要稍高于 2010 年;常熟站的土壤有效 Zn 含量在 3 个年份之间未达到显著性差异,均位于中等水平。

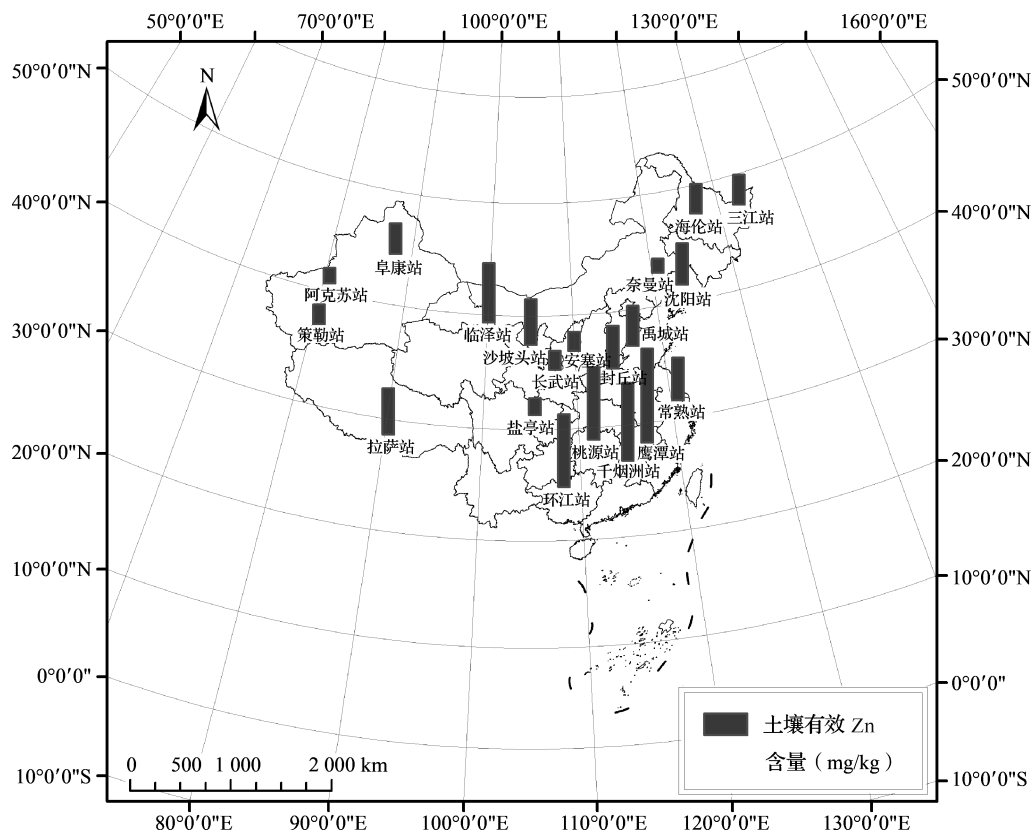


图 2 2010 年各农业生态站的平均土壤有效 Zn 含量

注：原始数据来自于国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统^[20]。

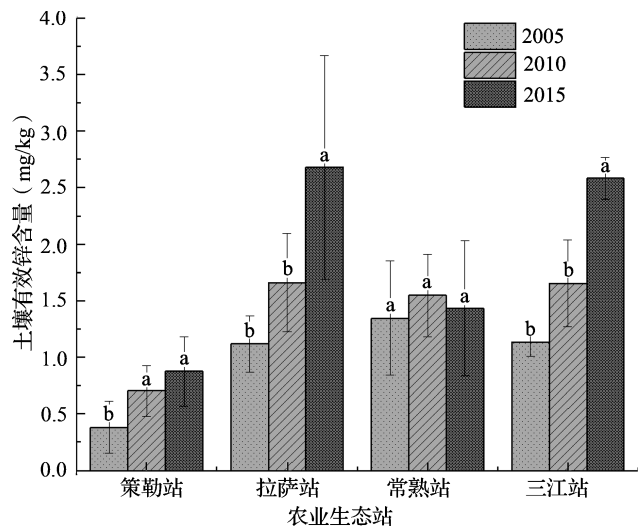


图 3 不同年份农业生态站的土壤有效 Zn 含量差异

注：同一生态站不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同土壤类型的土壤有效 Zn 含量

不同土类的土壤有效 Zn 含量存在显著差异，2005 年不同土类的土壤有效 Zn 含量在 0.25 ~ 2.52 mg/kg 之间，2010 年在 0.50 ~ 2.84 mg/kg 之间，2015 年在 0.66 ~ 2.82 mg/kg 之间（表 3）。以 2010 年为

例：水稻土和红壤等土类的土壤有效 Zn 含量均较高，而有效 Zn 含量较低的土类主要为草甸风沙土、石灰性紫色土和灌耕土等；2005 年的水稻土、红壤和草甸白浆土有效 Zn 的浸提方法为 0.1 mol/L 的盐酸，土壤有效 Zn 含量为水稻土>红壤>草甸白浆土，但没有达到显著性差异，剩余采用 DTPA 浸提的土类，土壤有效 Zn 含量为灰漠土、黄绵土和草甸风沙土等土类的有效 Zn 含量较低。时间序列上，不同土类的土壤有效 Zn 含量整体上呈增加趋势（图 4）。潮土的有效 Zn 含量在 2015 年显著高于 2010 年和 2005 年，潮土的土壤有效 Zn 含量由开始的低水平变为中等水平，到 2015 年升高到高水平；草甸白浆土在 2005 年虽然采用的是盐酸浸提，稍高于 2010 年，但是显著低于 2015 年，由低水平变为 2010 年的中等水平，在 2015 年升高到高水平；风沙土和脱潜水稻土的土壤有效 Zn 含量在 2005 年、2010 年和 2015 年这 3 个年份虽然有所变化，但是并没有达到显著性差异，有效 Zn 含量分级水平也没有发生变化。

表 3 不同年份的不同土类土壤有效 Zn 含量

(mg/kg)

土壤类型	有效 Zn 含量			土壤类型	有效 Zn 含量		
	2005 年	2010 年	2015 年		2005 年	2010 年	2015 年
黄绵土	0.39 ± 0.18cd	0.67 ± 0.17d	—	草甸风沙土	0.45 ± 0.07cd	0.50 ± 0.19d	—
脱潜水稻土	1.35 ± 0.51ab	1.55 ± 0.36cd	1.23 ± 0.34b	灌淤土	1.13 ± 0.26abcd	1.66 ± 0.38bc	—
黑垆土	0.48 ± 0.13cd	0.71 ± 0.20d	—	水稻土 *	2.52 ± 0.24a	2.84 ± 1.83a	—
潮土	0.91 ± 0.29bcd	1.64 ± 0.45c	2.82 ± 0.93a	红壤 *	1.60 ± 0.75a	2.32 ± 1.58ab	—
黑土	1.18 ± 0.19abc	1.06 ± 0.04cd	—	草甸白浆土	1.14 ± 0.13a	1.07 ± 0.07cd	2.59 ± 0.19a
潮棕壤	1.35 ± 0.29ab	1.64 ± 0.22c	—	灌耕土	—	0.56 ± 0.14d	—
盐化潮土	0.54 ± 0.02bcd	1.45 ± 0.45cd	—	棕色石灰土	—	2.69 ± 1.00ab	—
石灰性紫色土	1.63 ± 1.51a	0.55 ± 0.18d	—	潜育性水稻土	—	2.28 ± 0.44abc	—
风沙土	0.82 ± 0.92bcd	0.71 ± 0.22d	0.66 ± 0.15b	潯育水稻土	—	2.82 ± 1.22ab	—
灰漠土	0.25 ± 0.11d	1.12 ± 0.36cd	—	灌耕风沙土	—	2.15 ± 0.66abc	—

注: 不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$); * 代表有效 Zn 的浸提方法为 0.1 mol/L 的盐酸浸提, 其余采样点均为 DTPA 浸提。

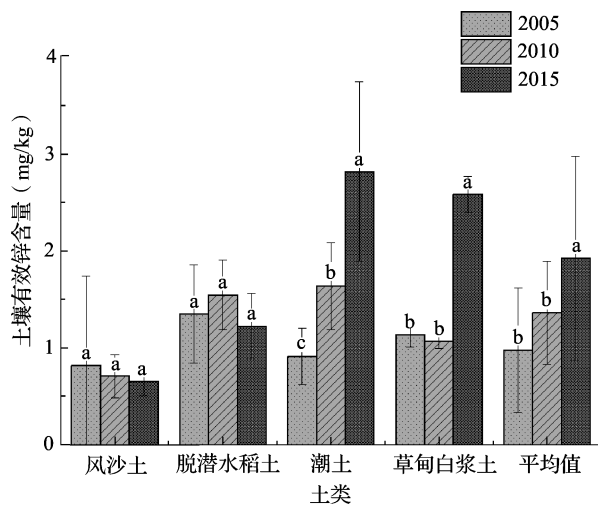


图 4 不同年份各土类土壤有效 Zn 含量差异

注: 不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同土地利用方式下的土壤有效 Zn 含量

各农业生态站的土地利用方式主要为旱地、水浇地、水田和林草地, 土地利用方式不同, 土壤有效 Zn 含量存在显著差异, 具体如图 5 所示。2005 年, 林草地的土壤有效 Zn 含量最高, 显著高于其它土地利用方式, 其次是水田, 有效 Zn 含量较低的是旱地和水浇地, 由于 2005 年林草地的采样点经过处理后只剩下一个, 因此难以具有代表性; 2010 年水田的有效 Zn 含量最高, 与其它土地利用方式之间达到了显著性差异, 旱地、水浇地和林草地之间差异不显著; 2015 年数据量较少, 林草地的数据缺失, 并且各土地利用方式下有效 Zn 含量

不具有显著性差异。在时间序列上, 各土地利用方式的土壤有效 Zn 含量也存在增加的趋势。

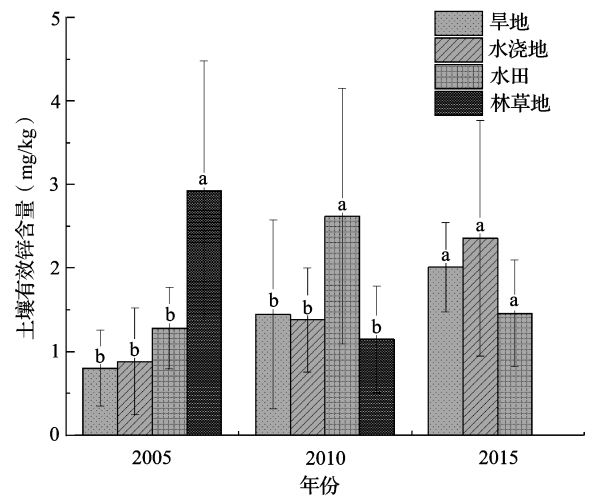


图 5 不同年份各土地利用方式下的土壤有效 Zn 含量

注: 2005 年去除了三江站和鹰潭站的数据, 所有土地利用方式的有效 Zn 均为 DTPA 浸提。

2.5 土壤有效 Zn 含量与土壤理化指标的相关性分析

将土壤有效 Zn 含量与有机质、pH 值、CEC、有效 N、有效 P 和有效 K 等进行 Pearson 相关分析 (表 4)。土壤有效 Zn 含量与土壤 pH 值呈显著负相关, 并在 2005 年和 2010 年达到极显著水平; 与土壤有机质含量呈正相关, 在 2005 年和 2010 年达到极显著水平, 但是在 2015 年相关性不显著; 与阳离子交换量相关性不高。此外, 土壤有效 N 与土壤

有效 Zn 在 2005 年和 2010 年达到了极显著正相关，但是在 2015 年相关性却不高；土壤有效 P 与土壤有效 Zn 之间存在正相关，在 2005 年达到了显著水平，并在 2015 年达到了极显著水平；土壤有效 K 与土壤有效 Zn 之间存在负相关，并在 2010 年和 2015 年达到了显著水平。

表 4 土壤有效 Zn 含量与土壤理化指标的 Pearson 相关性分析

年份	有机质	pH 值	阳离子交换量	有效 N	有效 P	有效 K
2005	0.358**	-0.423**	0.137	0.288**	0.221*	-0.170
2010	0.285**	-0.476**	0.002	0.328**	0.106	-0.205*
2015	0.251	-0.517*	-0.024	-0.089	0.751**	-0.439*

注：* 和 ** 分别表示相关程度达到显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$)。

3 讨论

土壤有效 Zn 含量可以反映土壤 Zn 的整体营养状况，对于作物正常生长有重大影响。大量研究发现^[24-26]，主要粮食作物，例如水稻和玉米，在土壤有效 Zn 含量低于 1 mg/kg 的缺 Zn 临界值时，会导致农作物减产^[5]，对以粮食作物为主食的发展中国家来说，人们极易出现缺 Zn 状况^[27]。

3.1 土壤有效 Zn 含量的时空差异变化

通过描述性统计分析可以发现，中国农田土壤的有效 Zn 含量整体上处于中等水平，需要通过补施 Zn 肥来提高土壤 Zn 的供给能力。变异系数可以反映人为因素对土壤有效 Zn 含量的影响程度，当土壤的变异系数 >100% 时，说明土壤受到了较强的人为干扰^[28]。土壤有效 Zn 含量均处于中等程度变异，说明农田耕地虽然会受到频繁的人为因素干扰，但是从全国范围看，人为因素对土壤有效 Zn 含量的影响并不是最主要的驱动因子。从时间序列上看，从 2005 年到 2015 年，土壤有效 Zn 含量整体上是上升的，这一点从各农业生态站、土类及土地利用方式的平均土壤有效 Zn 含量均可以看出来，土壤有效 Zn 含量逐年升高，甚至由 2005 年的低水平升高到 2015 年的高水平，例如三江站。一方面原因可能是因为种植模式和管理理念的转变，保持甚至提高了农田土壤的整体肥力；另一方面也不排除长期的施肥导致土壤酸化，因为从 2005 年到 2015 年的土壤 pH 值是逐渐降低的（表 1），土壤 pH 值降低可以提高土壤 Zn 的有效性^[29-31]。

农业生态站的分布区域不同，土类亦不同，土壤有效 Zn 含量存在显著差异（表 3）。中国的土壤类型分布具有明显的地带性差异，在我国东部形成了湿润海洋气候土壤地带谱，由北向南依次为暗棕壤 - 棕壤 - 黄棕壤 - 红壤与黄壤 - 赤红壤 - 砖红

壤；在中国北部的温带地区，由东至西形成了干旱内陆性土壤地带谱，依次分布着黑土 - 灰褐土 - 栗钙土 - 灰钙土 - 灰漠土^[32]，这与土壤有效 Zn 含量在全国范围内的分布变化也是紧密联系的，由北向南，东向西逐渐递减。不同的土类是不同的成土母质在不同的成土条件下生成的^[33-34]。因此，不同土类土壤有效 Zn 含量的差异情况也反映了成土母质和成土过程对其的一个间接影响。与土类类似，不同农业生态站的土地利用方式不同，土壤有效 Zn 含量存在显著差异（图 5）。以 2005 年和 2010 年为例（2015 年样本量太少，在此分析上不具代表性），土地利用方式中，水田的有效 Zn 含量是最高的（2005 年林草地的采样点只有一个，亦不考虑），这与相关的研究结论一致^[35]。土地利用方式反映了人为因素对土壤性质的扰动作用，例如施肥、灌溉和种植模式等，因此不同土地利用方式下土壤有效 Zn 含量差异是人为因素对其间接的影响。

3.2 土壤理化指标对土壤有效 Zn 含量的影响

Pearson 相关性分析可以反映两个变量之间的密切程度，相关系数可以描述线性关系的强弱和方向，进而可以分析两个变量之间联系的紧密程度^[36]。从表 4 可以看出，土壤有效 Zn 含量与土壤 pH 值存在负相关，与土壤有机质存在正相关，并在 2005 年和 2010 年达到了极显著水平。土壤 pH 值是土壤理化指标中的一个重要构成因素，Wang 等^[37]研究发现土壤 pH 值对土壤有效 Zn 含量的影响非常显著，pH 值升高会降低土壤 Zn 的有效性；Pardo 等^[38]分析了土壤 pH 值对于土壤有效 Zn 吸附解吸的影响，发现土壤 Zn 随着 pH 值的上升，吸附量上升，解吸量下降；随着 pH 值的下降，吸附量下降，解吸量上升。例如，本研究中，红壤、水稻土的土壤有效 Zn 含量较高，这

与土壤 pH 值变化关系密切, 2005 年红壤、水稻土的土壤 pH 值是最低的, 分别为 4.95 ± 0.18 和 5.62 ± 0.57 , 远低于年平均值 7.57 ± 1.24 及有效 Zn 含量较低的土类, 例如黄绵土 (8.43 ± 0.09)、风沙土 (8.12 ± 0.42) 等; 2010 年红壤 (4.55 ± 0.20) 和水稻土 (5.77 ± 1.08) 的 pH 值也远低于年平均值 (7.07 ± 1.51)、黄绵土 (8.59 ± 0.13) 和风沙土 (7.91 ± 0.06)。此外, 不同土地利用方式的土壤 pH 值, 2010 年不同土地利用方式下, 水田 pH 值 (5.91 ± 1.03) 显著小于旱地 (6.84 ± 1.58), 旱地显著小于水浇地 (8.16 ± 0.63); 2005 年水田 pH 值 (7.16 ± 0.99) 与旱地 (7.08 ± 1.50) 没有显著性差异, 但是两者均显著大于水浇地 (8.24 ± 0.45)。

土壤有机质含量不仅反映了土壤肥力的大小, 而且会影响土壤中金属元素的有效性, 有机质含量较高的土壤会增加土壤中金属元素的植物可利用性^[39-40]。在本研究中, 水田的土壤有效 Zn 含量大于旱地, 旱地大于水浇地, 与之相对应, 土壤有机质含量在 2005 年和 2010 年均水田显著大于旱地, 旱地显著大于水浇地 ($P < 0.05$)。2005 年和 2010 年的土壤有效 N 含量与有效 Zn 之间存在着极显著的相关关系, 研究发现, 元素 N 与元素 Zn 在肥-土-作物系统中存在协同作用^[41], 所以有效 N 与有效 Zn 之间存在显著正相关; 也有可能是因为土壤中的 N 90% 为有机 N^[42], 因此有机质与有效 N 之间具有显著的正相关性, 从而间接与有效 Zn 之间存在显著的正相关关系。土壤有效 K 与有效 Zn 之间也存在着负相关, 并且在 2010 年和 2015 年达到了显著水平, 目前还没有查阅到针对这两种元素之间相互作用的研究。但是, 红壤、水稻土等有效 Zn 含量较高的土类, 其土壤有效 K 含量比较低 (以土壤标准物质为例), 分别为 180 ± 10 mg/kg [GB W07416a (ASA-5a)] 和 250 ± 20 mg/kg [GB W07415a (ASA-4a)]; 黄绵土等土壤有效 Zn 含量较低的土类, 其土壤有效 K 含量为 330 ± 20 mg/kg [GB W07460 (ASA-9)], 所以土壤有效 K 与土壤有效 Zn 的负相关可能与土类有关; 土壤有效 Zn 在全国范围内呈南高北低、东高西低的分布趋势, 而土壤有效 K 含量在全国范围内是由东南向西北递增的一个分布趋势^[43], 所以地理位置分布因素也可以解释两者之间存在负相关的现象。此外, 土壤有效 P 与有效 Zn 之间呈正相关, 这与一些研究存在矛盾。例如, 研究发

现^[44-45], 土壤有效 P 含量的增加会促进 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀的生成, 从而降低土壤 Zn 的有效性, 并且 Zhang 等^[46] 进一步研究发现, 过量的施用磷肥不仅降低了土壤 Zn 的有效性, 小麦中 Zn 的生物利用率也会降低, 所以土壤有效 P 与有效 Zn 之间应存在拮抗作用。然而, 也有研究发现, 土壤 Zn 的有效性与土壤有效 P 之间存在正相关关系^[37]。所以 P 与 Zn 之间的相互作用还需要进一步的深入探讨, 以做出合理解释。

4 结论

本研究重点分析了土壤有效 Zn 含量的时空差异情况及相关的影响因素, 得出的具体结论如下:

(1) 中国农田土壤的有效 Zn 含量整体上呈南高北低, 东高西低的分布趋势, 这与全国范围内土壤 pH 值的分布、干湿区的划分及土类的地带性差异具有很高的相关性。

(2) 从 2005 年到 2015 年之间, 土壤有效 Zn 含量是上升的, 反映了土壤 Zn 营养状态的提高, 但是土壤缺 Zn 情况依然存在, 需要进一步的改善。

(3) 土壤理化指标中, 土壤 pH 值和有机质含量对土壤有效 Zn 含量均有着显著的影响, 可以作为改善缺 Zn 土壤的两个出发点, 例如, 施用土壤 pH 调理剂及增施有机肥等。但是中国土壤南酸北碱的整体趋势不会发生改变, 农家肥料的施用也要考虑环境效应等具体的问题, 例如粪肥中的重金属污染。因此, 需要更加深入的研究来将土壤有效 Zn 含量的影响因素进行进一步的归纳总结, 分类整理, 并针对性的提出具体可行的措施。

参考文献:

- [1] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律 [J]. 中国农业科学, 1994, 27 (1): 30-37.
- [2] 王振林, 沈成国, 余松烈. 小麦供锌状况对叶片结构及叶绿体超微结构的影响 [J]. 作物学报, 1993, 19 (6): 553-557.
- [3] Guliev N M, Bairamov S M, Aliev D A. Functional-organization of carbonic-anhydrase in higher-plants [J]. Soviet Plant Physiology, 1992, 39 (4): 537-544.
- [4] Ahmad W, Watts M J, Imtiaz M, et al. Zinc deficiency in soils, crops and humans: A review [J]. Agrochimica, 2012, 56 (2): 65-97.
- [5] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant and Soil, 2008, 302 (1): 1-17.
- [6] Yasuda H, Tsutsui T. Infants and elderlies are susceptible to

- zinc deficiency [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (2): 1–7.
- [7] Chasapis C T, Loutsidou A C, Spiliopoulou C A, et al. Zinc and human health: An update [J]. *Archives of Toxicology*, 2012, 86 (4): 521–534.
- [8] Black R E, Allen L H, Bhutta Z A, et al. Maternal and child undernutrition 1–maternal and child undernutrition: Global and regional exposures and health consequences [J]. *Lancet*, 2008, 371 (9608): 243–260.
- [9] Gibson R S, Manger M S, Krittaphol W, et al. Does zinc deficiency play a role in stunting among primary school children in ne thailand? [J]. *British Journal of Nutrition*, 2007, 97 (1): 167–175.
- [10] Shankar A H, Prasad A S. Zinc and immune function: The biological basis of altered resistance to infection [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1998, 68 (2): 447S–463S.
- [11] Fang Y Z, Yang S, Wu G Y. Free radicals, antioxidants, and nutrition [J]. *Nutrition*, 2002, 18 (10): 872–879.
- [12] Zhu H F, Zhao Y, Nan F, et al. Relative influence of soil chemistry and topography on soil available micronutrients by structural equation modeling [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 16 (4): 1038–1051.
- [13] Tkaczyk P, Bednarek W, Dresler S, et al. Relationship between assimilable–nutrient content and physicochemical properties of topsoil [J]. *International Agrophysics*, 2017, 31 (4): 551–562.
- [14] Liu H K, Xu F, Xie Y L, et al. Effect of modified coconut shell biochar on availability of heavy metals and biochemical characteristics of soil in multiple heavy metals contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 702–709.
- [15] Shi J C, Xu J M, Huang P M. Spatial variability and evaluation of status of micronutrients in selected soils around taihu lake, china [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8 (6): 415–423.
- [16] Zhu H F, Hu W, Bi R T, et al. Scale–and location–specific relationships between soil available micronutrients and environmental factors in the fen river basin on the chinese loess plateau [J]. *Catena*, 2016, 147: 764–772.
- [17] 刘永红, 倪中应, 谢国雄, 等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1710–1718.
- [18] 李珊, 张浩, 李启权, 等. 广元植烟土壤有效态微量元素的空 间变异特征及影响因素 [J]. *核农学报*, 2017, 31 (8): 1618–1625.
- [19] Qiang L, Zhou J H, Zhang Y Y, et al. Study on spatial distribution of soil available microelement in qujing tobacco farming area, china [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10 (1): 185–191.
- [20] 国家科技平台–国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统 [DB/OL]. [2019–01–05]. <http://rs.Cern.Ac.Cn/?jsessionid=568ad931603f816dad0c7225a9681342>.
- [21] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast china [J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 19–29.
- [22] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征 [J]. *地理研究*, 2001, 20 (2): 161–169.
- [23] 朱松丽. 土壤主要理化特性的空间变异性初步研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 1999.
- [24] Ram H, Rashid A, Zhang W, et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries [J]. *Plant and Soil*, 2016, 403 (1–2): 389–401.
- [25] Prasad R, Shivay Y S, Kumar D. *Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc* [M]. San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2014.
- [26] Cakmak I. *Zinc deficiency in wheat in turkey* [M]. Berlin Germany: Springer Netherlands, 2008.
- [27] Khoshgoftarmanesh A H, Schulin R, Chaney R L, et al. Micronutrient–efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30 (1): 83–107.
- [28] Zhang Y, Cai Y, Wang C Q, et al. Characters and influencing factors of the distribution of cultivated available soil Fe, Mn, Cu and Zn in Xichang city, Sichuan province, China [J]. *Journal of Geography & Geology*, 2012, 4 (2): 115–123.
- [29] Garcia–Gomez C, Obrador A, Gonzalez D, et al. Comparative study of the phytotoxicity of ZnO nanoparticles and Zn accumulation in nine crops grown in a calcareous soil and an acidic soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 770–780.
- [30] Guan D X, Sun F S, Yu G H, et al. Total and available metal concentrations in soils from six long–term fertilization sites across china [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (31): 31666–31678.
- [31] Cambier P, Michaud A, Paradelo R, et al. Trace metal availability in soil horizons amended with various urban waste composts during 17 years–monitoring and modelling [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2961–2974.
- [32] 关连珠. 普通土壤学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
- [33] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [34] 富德义, 汪淑哲, 朱颜明, 等. 三江平原土壤中的锌及锌肥效应研究 [J]. *地理科学*, 1984, 4 (3): 260–268.
- [35] Zhao H, Xia B, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near dabaoshan mine, southern china [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417: 45–54.
- [36] 李昕, 张明明. SPSS 22.0 统计分析从入门到精通 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [37] Wang Y Z, Huang Y, Shi Y, et al. Effects of phosphorus application methods on nutrition uptake and soil properties over

- 12-year field micro-plot trials: I. Soil-available micronutrients and their relationship with soil properties [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, 23 (1): 43–50.
- [38] Pardo M T, Guadalix M E. Zinc sorption-desorption by two anepts: Effect of pH and support medium [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2): 257–263.
- [39] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤铜、锌、铬含量空间变异特征及其影响因子分析 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43 (4): 737–743.
- [40] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学版)*, 2005, 20 (4): 539–543.
- [41] Shi R L, Zhang Y Q, Chen X P, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51 (1): 165–170.
- [42] 王士超, 周建斌, 陈竹君, 等. 温度对不同年限日光温室土壤氮素矿化特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015 (1): 121–127.
- [43] 李嘉熙, 吴功建. 中国生态环境地球化学图集 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [44] Gigliotti G, Businelli D, Giusquiani P L. Trace metals uptake and distribution in corn plants grown on a 6-year urban waste compost amended soil [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1996, 58 (2–3): 199–206.
- [45] Gibbs P A, Chambers B J, Chaudri A M, et al. Initial results from a long-term, multi-site field study of the effects on soil fertility and microbial activity of sludge cakes containing heavy metals [J]. *Soil Use and Management*, 2006, 22 (1): 11–21.
- [46] Zhang W, Liu D Y, Liu Y M, et al. Overuse of phosphorus fertilizer reduces the grain and flour protein contents and zinc bioavailability of winter wheat (*triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65 (8): 1473–1482.

Temporal and spatial difference and influencing factors analysis of soil available Zn of farmland in China

WANG Zi-teng^{1, 2}, GENG Yuan-bo^{1*}, LIANG Tao¹ (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Soil available Zn is an important index for evaluating the nutritional status of soil. The precision fertilization of micronutrients can be achieved by clarifying temporal and spatial distribution characteristics of soil available Zn content in China and taking effective measures to improve the soil available Zn content of soil types and regions of Zn deficiency. The data of this research are accessed from China Agricultural Eco-Station. The temporal and spatial distribution difference of soil available Zn content and the influence of different factors to soil available Zn content are analyzed, like the soil types, land utilizations and soil physicochemical properties (soil organic matter, pH, avail N, avail P, avail K and cation exchange capacity). The results show: 1) Soil available zinc content in China is in the middle level as a whole, the distribution trend is south-high and north-low, east-high and west-low. The distribution of soil available Zn content has a good correlation with the soil pH distribution, division of dry and wet areas and zonal distribution of soil types; 2) In time series, soil available Zn content shows an upward trend from 2005 to 2015. 3) Soil available Zn content has the significant difference between different soil types and land utilizations. Among soil types, the red earth and paddy soil have the higher soil available Zn content than the others', in contrast, soil available Zn contents of Aeolian sand soil, Loessial soil and Meadow sandy soil are lower than others'. Among land utilizations, soil available Zn content of paddy field is significant higher than others; 4) Among soil physicochemical properties, soil pH and soil organic matter content have a significant impact on soil available Zn content. In summary, among different soil types, Aeolian sand soil, Loessial soil and Meadow sandy soil need the supplement of Zn fertilizer; among different land use patterns, the irrigated land and dry land should be emphasized the supplement of Zn fertilizer. In addition, the soil available Zn content can be improved by the adjustment of the soil pH and application of manure.

Key words: farmland soil; available zinc; temporal-spatial difference; pH; organic matter