

受污染耕地稻田土壤重金属污染调查及评价

黄其颖¹, 卢忠诚¹, 叶楠¹, 生艳菲¹, 卢九斤¹, 高健苗¹, 傅丽青^{1,*}

1. 金华市农业技术推广与种子管理中心, 浙江金华 321000

摘要: 为探明稻田安全利用区土壤重金属污染分布特征与潜在生态风险水平, 本研究以 Cd、Hg、As、Pb、Cr 5 种元素为监测对象, 系统开展土壤污染状况调查与生态风险综合评估。金华市某安全利用区 16 个稻田点位的 0-40 cm 剖面分析显示: Cd 是唯一超标的元素。10-20 cm 亚耕层的 Cd 超标率 (25%) 是 0-10 cm 表层 (6.25%) 的 4 倍, 且存在 3 个点位仅在亚耕层超标。这与同区域工业区下游稻田 Cd 污染局限于表层、亚耕层无超标的格局形成鲜明对比。尽管单因子评价显示 5 种元素整体清洁, 但内梅罗综合指数显示 12.5% 的样点处于污染警戒线, Cd 的地累积指数 (-0.25) 和潜在生态风险系数 (39.47) 均显著高于其他元素。从总体来看, 安全利用区的 Cd 已向下迁移至亚耕层, 其累积风险可能被低估, 建议将 10-20 cm 土层纳入常规监测。

关键词: 稻田; 重金属; 亚耕层; 生态风险评估

Investigation and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils of Agriculturally Polluted Farmland

Qiyang Huang¹, Zhongcheng Lu¹, Nan Ye¹, Yanfei Sheng¹, Jiujin Lu¹, Jianmiao Gao¹, Liqing Fu^{1,*}

1. Jinhua Agricultural Technology Extension and Seed Management Center, Jinhua, Zhejiang 321000, China

Abstract: To assess the current status of heavy metal pollution and the level of ecological risk in paddy soil, this study focused on the heavy metals Cd, Hg, As, Pb, and Cr in the paddy soil of a safety utilization area. Analysis of 0-40 cm soil profiles from 16 paddy sites in a safe utilization area of Jinhua City revealed that Cd was the only element exceeding the risk screening value of GB 15618-2018. The Cd exceedance rate in the 10-20 cm subsurface layer (25%, 4 sites) was four times that in the 0-10 cm surface layer (6.25%, 1 site), with three sites (No. 7, 8, and 13) showing exceedance exclusively in the subsurface layer. This pattern contrasts with a previous study in the same region, where Cd contamination in paddy soils downstream of an industrial area was confined to the surface layer with no exceedance in the subsurface layer. Although single-factor evaluation indicated that all five heavy metals were generally at clean levels, the Nemerow integrated pollution index placed 12.5% of the sampling sites at the warning line. The geo-accumulation index (-0.25) and potential ecological risk factor (39.47) of Cd were significantly higher than those of other elements. These findings suggest that Cd has migrated downward into the subsurface layer within this safe utilization area, implying that the risk of Cd accumulation may be underestimated if only surface soils are monitored. It is recommended that the 10-20 cm soil layer be incorporated into routine monitoring programs in safe utilization areas.

Keywords: Paddy Soil; Heavy Metals; Subsurface Layer; Ecological Risk Assessment

土壤重金属污染因持久性和食物链传递风险而备受关注, 过量累积可导致土壤生态功能退化并威胁农产品安全与人体健康^[1-3]。2014 年全国土壤污染调查显示, 我国耕地土壤超标率为 19.4%, 重

金属是主要污染物, Cd、Hg、As、Pb、Cu、Ni 超标较为普遍^[4]。金华市是浙江省重要水稻产区。郑则华等^[5]对同区域某工业区下游稻田的分层调查(0-10、10-20、20-40 cm)发现, Cd 是主要的污染元素, 但超标仅出现在 0-10 cm 表层(1 个点位), 10-20 cm 亚耕层及 20-40 cm 深层均未检出超标。然而, 安全利用区的污染垂向格局是否相同, 尚不清楚。考虑到当前土壤环境监测与风险管控主要依据表层土壤(0-20 cm)的监测结果, 若安全利用区的 Cd 已向下迁移至亚耕层, 甚至出现“表层合格、亚层超标”的情况, 则现行的监测体系将可能漏检此类污染风险。为此, 本研究以金华市某安全利用区连片稻田为对象, 分层采集 0-10、10-20 及 20-40 cm 三个土层的剖面样品, 通过单因子指数、内梅罗综合指数、地累积指数及潜在生态风险指数等多方法耦合评价, 系统分析 Cd 等重金属的垂向分布特征, 并重点评估亚耕层 Cd 累积的生态风险, 以期为安全利用区的精准管控提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处浙江中部金华地区, 属亚热带季风气候, 雨热同期, 区域上游分布小型工业企业, 以水稻种植为主。

1.2 样品采集与处理

本研究于 2020 年水稻收获季(9 月)布设 16 个采样点, 分别在 0-10 cm、10-20 cm 和 20-40 cm 三层采集土壤样品, 共获 48 份。土样经自然风干、去杂、研磨后, 过 2 mm 筛用于 pH 测定; 另分取部分土样过 0.15 mm 筛, 用于重金属全量分析。

1.3 测试方法

样品前处理采用 HNO₃-HCl-HClO₄微波消解体系。Cd、Pb 含量通过石墨炉原子吸收光谱法测定, Hg、As 采用原子荧光光谱法, Cr 则使用火焰原子吸收光谱法。质控措施包括: 国家标准土壤参比物质、平行样分析及加标回收实验。土壤 pH 值按水土比 2.5:1 浸提, 静置后用 pH 计测定。

1.4 土壤重金属污染与生态风险评价

本研究采用多指数法综合评估土壤重金属污染程度与生态风险, 所有指数计算均以 Excel 2016 完成。

污染程度评估: 采用单因子指数法^[6]判断各重金属是否超标, 即以实测含量除以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的风险筛选值^[8]; 同时采用内梅罗综合指数法^[7]评价土壤整体污染水平, 该指数兼顾各元素的平均值与最大值。

富集来源识别: 采用地累积指数法(Igeo)^[9]区分自然成岩与人为活动对重金属富集的影响。以浙江省土壤地球化学背景值^[10]为参比, 计算公式中引入系数 1.5(以考虑成岩作用引起的背景值波动)。当 Igeo > 0 时, 表明存在人为输入。

生态风险评估: 采用 Hakanson 潜在生态风险指数法^[11]评估重金属的生态危害。该方法综合考虑元素含量与毒性响应, Cd、Hg、As、Pb、Cr 的毒性系数分别取 30、40、10、5、2^[12]。以浙江省土壤地球化学背景值为参比^[10], 计算各元素的潜在生态风险系数(Er)和综合潜在生态风险指数(RI)^[13]。同时, 采用生态风险预警指数(IER)^[14]进行风险预警, IER 风险预警分级标准为: IER ≤ 0 属于无警, 0 < IER ≤ 1 属于预警, 1 < IER ≤ 3 属于轻警, 3 < IER ≤ 5 属于中警, IER > 5 属于重警^[15]。土壤重金属潜在风险分级标准如表 1 所示。

表1 土壤重金属潜在风险分级标准

Table 1 Classification criteria for potential risk of soil heavy metals

潜在生态风险	轻度	中度	强	很强	极强
<i>Eri</i>	<40	40-80	80-160	160-320	≥320
<i>RI</i>	<150	150-300	300-600	600-1200	≥1200

1.5 数据处理

针对各采样点的土壤 pH 及重金属含量, 采用 Excel2016 进行描述性统计分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤 pH 状况

研究区土壤 pH 在 5.5-6.5 之间, 属于酸性土, 其中 0-10 cm 土层有 6 个点位 pH 小于 5.5, 其余在 5.5-6.5 之间; 10-20cm 土层有 7 个点位 pH 小于 5.5, 其余在 5.5-6.5 之间; 20-40cm 土层有 4 个点位 pH 小于 5.5, 其余在 5.5-6.5 之间。各土层土壤 PH 状况如表 2 所示。各土层土壤 pH 各等级分布情况如表 3 所示。

表2 各土层土壤 pH 状况

Table 2 Soil pH status in different soil layers

土壤性质	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数%
pH (0-10cm)	5.09	5.91	5.55	0.23	4.11
pH (10-20cm)	5.31	5.96	5.64	0.18	3.26
pH (20-40cm)	5.14	6.14	5.72	0.27	4.72

表3 各土层土壤 pH 各等级分布情况 (参考《浙江土壤》)

Table 3 Distribution of soil pH grades in different soil layers (based on "Soils of Zhejiang")

指标	0-10cm	10-20cm	20-40cm
≤5.5	6	7	4
5.5-6.5	10	9	12
6.5-7.5	0	0	0

2.2 土壤重金属含量特征描述分析

由表 4 可知, 研究区 0-10 cm、10-20 cm、20-40 cm 三个土层中, Cd、Hg、As、Pb、Cr 5 种重金属的含量统计特征垂向分布与空间差异明显。其中, Cd 与 Cr 呈现典型的表层富集规律^[16], Cd 在 0-10 cm、10-20 cm、20-40 cm 土层的平均含量分别为 0.26 mg/kg、0.26 mg/kg、0.19 mg/kg, Cr 对应平均含量为 15.82 mg/kg、14.63 mg/kg、12.75 mg/kg, 二者均随土层深度增加呈递减趋势; As 则表现出独特的深层累积特征, 其平均含量由表层的 3.28 mg/kg、次表层的 3.73 mg/kg 逐步升高至 20-40 cm 土层的 4.40 mg/kg。Hg 与 Pb 在各土层间含量相对稳定, Hg 的平均含量介于 0.09-0.10 mg/kg 之间, Pb 的平均含量介于 30.36-31.59 mg/kg 之间, 无明显垂直分异。与《农用地土壤污染风险筛选值》(GB 15618-2018) 相比^[17], 0-10 cm 和 10-20 cm 土层共有 4 个点位重金属 Cd 超标, 其余五种重金属含量均未超标; 其中, 0-10 cm 土层土壤中 6 号点位超标, 该层超标率为 6.25%; 10-20 cm 土层土壤中 6、7、8 和 13 号点位超标, 该层超标率为 25%。说明研究区已出现 Cd 浅层富集趋势。

土壤中重金属含量的变异系数可反映其空间离散程度。一般而言, 变异系数越大, 元素分布受局部人为扰动的影响越显著^[18,19]。变异系数 < 16% 时为低度变异, 16% < 变异系数 < 36% 为中度变异, > 36% 时为高度变异^[20]。研究区内 0-10 cm 土壤重金属含量变异系数为 As (46.65%) > Cr (37.74%) > Hg (31.25%) > Cd (28.21%) > Pb (11.54%), 表明 As 和 Cr 为高度变异, Hg、Cd 为中度变异, Pb 为轻度变异。10-20 cm 土壤重金属含量变异系数为 Cd (48.48%) > As (46.65%) > Cr (41.69%)

>Hg (30.44%) >Pb (15.18%)，Cd、As、Cr 为高度变异，Hg 为中度变异，Pb 为轻度变异。20-40 cm 土壤重金属含量变异系数为 Cd (52.74%) >As (46.51%) >Cr (40.25%) >Hg (39.63%) >Pb (17.80%)，Cd、As、Cr、Hg 均为高度变异，Pb 为中度变异。研究区各土层 As 与 Cd 空间异质性显著，受人为干扰强烈，其含量差异可能与耕作管理、外源输入等人类活动密切相关。

表4 各土层重金属调查结果统计表 (单位: mg/kg)

Table 4 Statistical results of heavy metal concentrations in different soil layers (unit: mg/kg)

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数%	
Cd	0-10cm	0.13	0.39	0.26	0.08	28.21
	10-20cm	0.1	0.51	0.26	0.13	48.48
	20-40cm	0.04	0.36	0.19	0.10	52.74
Hg	0-10cm	0.05	0.14	0.09	0.03	31.25
	10-20cm	0.05	0.17	0.1	0.03	30.44
	20-40cm	0.05	0.18	0.09	0.04	39.63
As	0-10cm	1.16	6.22	3.28	1.53	46.65
	10-20cm	1.51	6.58	3.73	1.61	43.24
	20-40cm	1.24	7.74	4.40	2.05	46.51
Pb	0-10cm	25.4	39.2	31.18	3.60	11.54
	10-20cm	26.6	45.6	31.59	4.80	15.18
	20-40cm	22	41.7	30.36	5.41	17.80
Cr	0-10cm	10	30	15.82	5.97	37.74
	10-20cm	8	26	14.63	6.10	41.69
	20-40cm	5	24	12.75	5.13	40.25

2.3 土壤重金属污染评价

2.3.1 单因子污染指数评价和内梅罗综合指数评价

表5显示，0-10 cm 耕层土壤中，5种重金属的单因子污染指数均值排序为：Cd (0.67) > Pb (0.33) > Hg (0.18) > As (0.11) > Cr (0.06)，全部低于1.00，表明该层土壤处于清洁等级。

表5 重金属单因子污染指数

Table 5 Single-factor pollution index of heavy metals

指标	单因子污染指数					综合指数
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	
最大值	1.03	0.280	0.21	0.431	0.121	0.762
最小值	0.324	0.093	0.04	0.254	0.042	0.272
平均值	0.69	0.180	0.11	0.33	0.064	0.53
标准差	0.203	0.054	0.053	0.05	0.024	0.14
变异系数%	29.48	30.23	47.86	13.71	37.87	27.43

由表6可知，Cd是唯一出现超标的元素，93.75%的样点处于清洁水平，其余6.25%为轻度超标，无中重度污染。Pb、Hg、As、Cr全部样点均未超标。内梅罗综合指数在0.282-0.768之间，87.5%的样点为安全等级，12.5%处于污染警戒线。总体来看，研究区土壤整体安全，但局部存在镉污染风险，需加强源头防控与日常监管。

表6 单因子污染指数和内梅罗综合指数重金属污染点位分布

Table 6 Distribution of heavy metal pollution sites based on single-factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index

单因子指数	污染等级	点位占比 (%)					综合指数	污染等级	点位占比 (%)
		Cd	Pb	Hg	As	Cr			
$P \leq 1$	清洁	93.75	100	100	100	100	$P_i \leq 0.7$	安全	87.5
$1 < P \leq 2$	轻度污染	6.25	0	0	0	0	$0.7 < P_i \leq 1$	警戒	12.5
$2 < P \leq 3$	中度污染	0	0	0	0	0	$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	0
$P > 3$	重度污染	0	0	0	0	0	$2 < P_i \leq 3$	中度污染	0

2.3.2 地累积指数法

地累积指数法是单因子评价方法之一，可以同时反映自然条件下各种地质作用及人为活动对重金属积累的影响^[21]。以浙江省土壤背景值为参考，地累积指数计算结果由表7所示，5种重金属的均值排序为 Cd (-0.25) > Pb (-0.74) > Hg (-1.40) > As (-2.98) > Cr (-3.12)。Hg、As、Pb、Cr 所有样点的地累积指数均低于0，无污染；Cd 的均值为 -0.25，但个别样点呈轻微富集(地累积指数>0)。

表7 地累积指数评价结果表

Table 7 Evaluation results of geo-accumulation index

元素	<i>I_{geo}</i> 值		<i>I_{geo}</i> ≤ 0		0 < <i>I_{geo}</i> ≤ 1		1 < <i>I_{geo}</i> ≤ 2		2 < <i>I_{geo}</i> ≤ 3		3 < <i>I_{geo}</i> ≤ 4	
	变化范围	平均值	样品数	比率	样品数	比率	样品数	比率	样品数	比率	样品数	比率
Cd	-1.21-0.38	-0.25	11	68.75	5	21.25	0	0	0	0	0	0
Hg	-2.32--0.68	-1.40	16	100	0	0	0	0	0	0	0	0
As	-4.28--1.85	-2.98	16	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	-1.05--0.42	-0.74	16	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	-3.75--2.17	-3.12	16	100	0	0	0	0	0	0	0	0

2.3.3 潜在生态风险评价和生态风险预警

表8数据表明，研究区综合潜在生态风险指数均值为70.32，整体属轻微生态风险等级。Cd为最主要的风险贡献元素(Er均值39.47)，其样点中轻度与中度风险占比相近，个别点位达中度风险；Hg个别样点也出现中度风险。Pb、Hg、As、Cr的Er均值均低于40，属于轻度危害。5种元素风险排序为：Cd > Hg > Pb > As > Cr。此外，生态风险预警指数(IER)均值0.91，处于预警区间(0.70-1.09)，个别点位达轻度预警。

表8 重金属潜在生态风险评价及生态风险预警

Table 8 Potential ecological risk assessment of heavy metals in paddy soil

指标	潜在生态危害指数 <i>E_r</i>					<i>R_I</i>	<i>I_{ER}</i>
	Cd	Hg	As	Pb	Cr		
最大值	58.50	37.33	4.15	5.60	0.67	93.61	1.09
最小值	19.50	12.00	0.77	3.36	0.22	45.65	0.70
平均值	39.47	23.83	2.13	4.52	0.36	70.32	0.91
标准差	10.92	7.33	1.08	0.49	0.13	13.99	0.12
变异系数	27.68%	30.76%	50.50%	10.81%	35.88%	19.89%	13.44%

2.3.4 Cd的垂向分布特征与亚耕层累积风险

本研究发现，10-20 cm亚耕层的Cd超标率(25%，4个点位)高于0-10 cm表层(6.25%，1个点位)，且存在7、8、13号三个点位仅在亚耕层超标(表4)。作为对比，郑则华等^[6]在同区域工业区下游稻田的类似分层调查显示，Cd超标仅出现在0-10 cm表层(1个点位)，10-20 cm及20-40

cm 土层均未检出超标。由此可见,不同利用类型稻田土壤中 Cd 的垂向分布存在明显差异。导致这一差异的原因可能包括污染历史、土壤性质和土地利用历史三个方面。污染历史方面,安全利用区的 Cd 可能来自更早期的积累,长时间向下迁移至亚耕层;而工业区下游的 Cd 可能为近期输入,尚未发生明显的垂向迁移。土壤性质方面,本研究区土壤 pH 多为 5.5-6.5,部分点位低于 5.5(表 2、表 3),酸性条件可促进 Cd 的活化与淋溶^[22,23];郑则华等^[5]的研究未报道 pH 分层数据,若其土壤 pH 较高,则 Cd 的迁移性可能相对较弱。土地利用历史方面,安全利用区可能经历过深翻耕作,将表层污染的土壤带入亚耕层,或曾施用含 Cd 较高的有机肥或磷肥,导致 Cd 在亚耕层直接累积。

当前土壤环境质量监测与风险管控主要依据表层(0-20 cm)的监测结果^[17]。本研究中“表层合格、亚层超标”点位的存在提示,仅监测耕层可能不足以全面评估 Cd 的累积风险,尤其当水稻根系可深达 20 cm 甚至更深时,亚耕层的 Cd 仍可能被作物吸收^[2]。因此,建议在安全利用区将 10-20 cm 土层纳入常规监测,并在酸性土壤区域关注 Cd 的垂向迁移风险。

3 结论

(1) 依据 GB 15618-2018《农用地土壤污染风险管控标准》筛选值,研究区 0-20 cm 耕层共有 4 个点位 Cd 超标,其中 0-10 cm 表层 1 个点位超标(超标率 6.25%),10-20 cm 亚耕层 4 个点位超标(超标率 25%)。Hg、As、Pb、Cr 在各土层均未超标。各土层中 As、Cd 的变异系数处于较高水平,表明受人为活动影响明显。

(2) 单因子污染指数显示,5 种重金属单因子指数均 <1 ,土壤整体处于清洁等级;但内梅罗综合指数评价表明,12.5%的点位处于污染警戒线,生态风险预警指数均值为 0.91,达预警区间。

(3) 地累积指数评价结果表明,Cd 是研究区的主要污染元素(均值-0.25),局部存在轻微富集;潜在生态风险评价证实,Cd 的生态风险系数(均值 39.47)显著高于其他元素,是研究区稻田土壤生态风险的首要贡献因子。

(4) 与同区域工业区下游稻田的研究相比,本文发现安全利用区的 Cd 已向下迁移至 10-20 cm 亚耕层,且存在“表层合格、亚层超标”的点位。这一结果表明,仅监测表层可能不足以全面评估安全利用区的 Cd 累积风险。建议将 10-20 cm 土层纳入常规监测,并在酸性土壤区域重点关注 Cd 的垂向迁移。

参考文献

- [1] 赵方杰,谢婉滢,汪鹏.土壤与人体健康[J].土壤学报,2020,57(01):1-11.
- [2] 付成,王佳彬,蒙丽,等.常规田间种植环境下重金属元素在土壤-水稻系统的迁移特征[J].环境科学,2025,46(09):6066-6074.
- [3] 陈振华,柳丹.景宁县某废弃铅锌矿周围农田土壤重金属污染评价与来源分析[J].浙江农业科学,2024,65(9):2231-2235.
- [4] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].2014.
- [5] 郑则华,黄其颖,叶正钱,等.金华市某工业区下游稻田土壤调查及重金属风险评价[J].南方农业,2025,19(19):111-116.
- [6] Xu Z, Mi W B, Mi N, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in desert steppe soil related to transportation and industrial activities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(31): 38835-38848.
- [7] 李卫平,王非,杨文焕,等.包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J].生态环境学报,2017,26(11):1977-1984.
- [8] 郑雪云,张金兰,胡晋,等.农用地土壤重金属污染评价及来源解析[J].环境生态学,2023,5(8):9-14.
- [9] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.
- [10] 杨楠楠,韩玲,刘明.基于信息扩散模型的汴东新城区土壤重金属潜在生态风险评估[J].环境科学,2023,7(3):1-19.

- [11] 董岩翔, 郑文, 周建华, 等. 浙江省土壤地球化学背景值[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [12] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [13] 甘国娟, 刘伟, 邱亚群, 等. 湘中某冶炼区农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2013, 32(1): 132-138.
- [14] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1233-1241.
- [15] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1075-1086.
- [16] 朱舒, 李舒怡, 鱼洋, 等. 关中平原农田土壤剖面重金属空间分布、影响因素、风险评价及源解析[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2501-2511.
- [17] 李萍, 吴涛, 蒋国俊, 等. 金华市耕地土壤重金属来源解析及健康风险空间分异[J]. 环境科学学报, 2022, 42(11): 257-266.
- [18] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, (1): 33-40.
- [19] 陆安祥, 王纪华, 潘瑜春, 等. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1578-1583.
- [20] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1834-1844.
- [21] 罗旭, 杨林, 申小歌, 等. 重庆市铜梁区菜地土壤重金属污染现状、源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2025, 46(9): 6037-6045.
- [22] 李静, 徐绍辉. 不同 pH/离子强度时 Cu/Cd 复合污染土壤解吸和迁移特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1026-1034.
- [23] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 439-444.

第1作者简介: 黄其颖 (1989-), 男, 硕士研究生, 农艺师, 研究方向: 从事土壤肥料的研究与推广工作, E-mail: 15088629896@163.com。

*** 通讯作者简介:** 傅丽青 (1972-), 女, 高级农艺师, 研究方向: 主要从事作物测土配方施肥等方面研究, E-mail: fu_liqing@hotmail.com。