



· 青年编委专刊 ·

# 基于探索性因子分析的土壤养分与重金属 权衡关系

杨 阳,谢国浩,陈卫平

(中国科学院 生态环境研究中心 区域与城市生态安全全国重点实验室,北京 100085)

**摘要** 对土壤养分与重金属元素动态交互关系的解析是保障农田土壤可持续安全利用的关键一环。当前研究多聚焦土壤有机质或单一重金属污染物,难以有效量化土壤肥力提升过程中的重金属累积风险,且缺乏对不同农田管理措施长期应用效果的可持续性评估方法。该文以我国典型黑土区为例,应用探索性因子分析方法(EFAM)整合21项土壤理化指标,结合情境模拟定量解析土壤养分与重金属元素的动态交互关系。结果表明,区域土壤养分可以根据3个土壤因子来识别:土壤有机质、土壤速效养分和土壤养分缓冲结构。耦合富集因子(EF)进行情境分析发现,与传统耕作情境相比,高强度农业耕作情境下土壤有机质和速效磷分别增加了13.1%和38.3%,但土壤镉(Cd)含量显著增加74.8%。进一步的长时段模拟显示,未来50年高强度农业耕作情境下区域土壤Cd含量从 $0.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究表明,区域磷肥的长期过量施用会导致土壤养分盈余并造成Cd持续累积,保持土壤有效磷适宜水平是平衡养分利用与污染风险的关键。探索性因子分析方法和情境模拟手段的联合应用有助于提升区域农田土壤长效保护决策的科学性。

**关键词** 探索性因子分析;情境模拟;土壤养分权衡;镉;富集因子

**中图分类号:**X53 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-06-010

## Research on the trade-off relationship between soil nutrients and heavy metals based on exploratory factor analysis

YANG Yang, XIE Guohao, CHEN Weiping

(State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract** Deciphering the dynamic interactions between soil nutrients and heavy metals is a key step to ensuring the sustainable and safe use of agricultural soils. Current studies mainly focus on soil organic matter or a single heavy metal pollutant, which makes it difficult to effectively quantify the risk of heavy metal accumulation during soil fertility improvement, and lack methods to evaluate the long-term sustainability of different farmland management practices. In this study, a typical black soil region in China was taken as an example. An exploratory factor analysis method (EFAM) was applied to integrate 21 soil physicochemical indicators, and scenario simulations were employed to quantitatively analyze the dynamic interactions between soil nutri-

收稿日期:2025-08-20

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3704805);国家自然科学基金(42277385)。

第一作者:杨阳,男,副研究员,硕士生导师,从事土壤污染过程模拟和风险评估研究,yyang@rcees.ac.cn。

ents and heavy metals. Results showed that soil nutrients can be characterized based on three soil factors: soil organic matter, soil available nutrients, and soil nutrient buffering structure. By classifying agricultural intensity scenarios using the enrichment factor, it was found that fertilization enhanced the level of available nutrients and significantly increased soil organic matter and available phosphorus by 13.1% and 38.3%, respectively. However, the soil Cd concentration in the high-intensity agricultural scenario (HS) significantly increased by 74.8% compared to the traditional agricultural area (TS). Further long-term simulations indicated that under high-intensity farming scenarios, soil Cd concentrations would increase from  $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  over the next 50 years. The study demonstrated that long-term excessive application of phosphate fertilizers leads to nutrient surpluses and continuous Cd accumulation, whereas maintaining appropriate levels of soil available phosphorus is a key to balancing nutrient utilization and pollution risk. The combined application of EFAM and scenario simulation provides a scientific basis for enhancing the long-term protection and sustainable management of agricultural soils.

**Keywords** exploratory factor analysis; scenario simulation; soil nutrient trade-off; cadmium; enrichment factor

为应对全球耕地退化与粮食需求压力,化肥投入已成为维持农田土壤生产力的关键手段<sup>[1-2]</sup>。近几十年来,化肥投入与农作物产量呈非线性关系,部分研究指出肥料过量施用会导致农作物减产<sup>[3-4]</sup>,并造成土壤重金属的显著累积<sup>[4-5]</sup>,对农业生产和人类健康造成危害。我国农田土壤重金属(HMs)污染形势严峻。2014 年全国土壤污染普查显示,19.4% 的农田样本存在镉(Cd)、汞(Hg)超标现象。长期施肥是土壤重金属累积的主要来源之一,因其隐蔽性高、交互过程复杂而受到国内外学者的广泛关注。包立旭等研究对黑龙江省黑土区重金属来源解析指出,农业活动是土壤 Cd 主要贡献源<sup>[6]</sup>。Shi 等指出过去 40 年来,中国北方土壤 Cd 累积量逐渐增加,并且与施肥量显著相关<sup>[7]</sup>。Li 等研究发现,近几十年来化肥投入与作物产量呈非线性关系,过量施用反致减产<sup>[3]</sup>。先前的研究已经广泛报道了肥料对土壤重金属含量的影响<sup>[5,8]</sup>,然而,当前研究多聚焦较短时间段施肥后土壤重金属含量变化这一单项指标,对于如何量化长期施肥在土壤养分提升和重金属累积之间交互关系的研究仍然较为欠缺,这也是当前影响我国农田土壤可持续高效管理的瓶颈<sup>[9-11]</sup>。

近年来,人们尝试使用更广泛的数据集来描述土壤养分功能和动态过程<sup>[12-13]</sup>。Lu 等使用包含 24 个土壤属性的数据集阐明废水灌溉对土壤功能的系统性扰动,证明了多属性方法对于理解土壤系统的价值<sup>[14]</sup>。Gibbons 等研究基于不同农场土壤、养分管理等调查量化了养分水平和环境

污染风险之间的权衡,指出养分失衡对作物生产和环境都有负面影响<sup>[15]</sup>。这些研究表明,更广泛的数据集对于准确评估土壤变化至关重要,但仍需要将这些发现与长期环境风险联系起来<sup>[16]</sup>。探索性因子分析(exploratory factor analysis method, EFAM)方法是近年来的研究热点,其优势在于揭示土壤质地与污染物累积之间的交互关系<sup>[17]</sup>。该方法不仅可用于不同环境变量间的权衡,也可用于探索新的潜在综合变量<sup>[18]</sup>。EFAM 与多情境模拟的有效结合,有助于精确量化区域土壤养分水平与重金属污染风险之间的权衡关系及区域土壤管理决策优化,但相关研究较为缺乏。

本研究以我国典型黑土区为例,通过区域调查构建了包含 21 个土壤理化性质的数据集,通过 EFAM 模型和富集因子量化土壤肥力与土壤重金属累积之间的权衡关系,结合情境模拟方法开展长期磷肥下区域土壤 Cd 累积趋势评估,为区域农田土壤的可持续高效利用提供决策支撑。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区

研究区位于中国黑龙江省海伦市农业示范区,是松嫩平原重要的商品粮生产基地,年平均气温  $2^{\circ}\text{C}$ ,降水量  $500 \sim 600 \text{ mm}$ 。根据联合国粮农组织(FAO)的土壤分类系统<sup>[19]</sup>,黑土是该区域的主要土壤类型,主要种植水稻、玉米和大豆。本研究于 2022 年 8 月在整个研究区域农田采集了共 859 个表层土壤样品( $0 \sim 15 \text{ cm}$ )(见图 1)。所有

土壤样品均保存在密封袋中,并带回实验室进行后续化学分析。

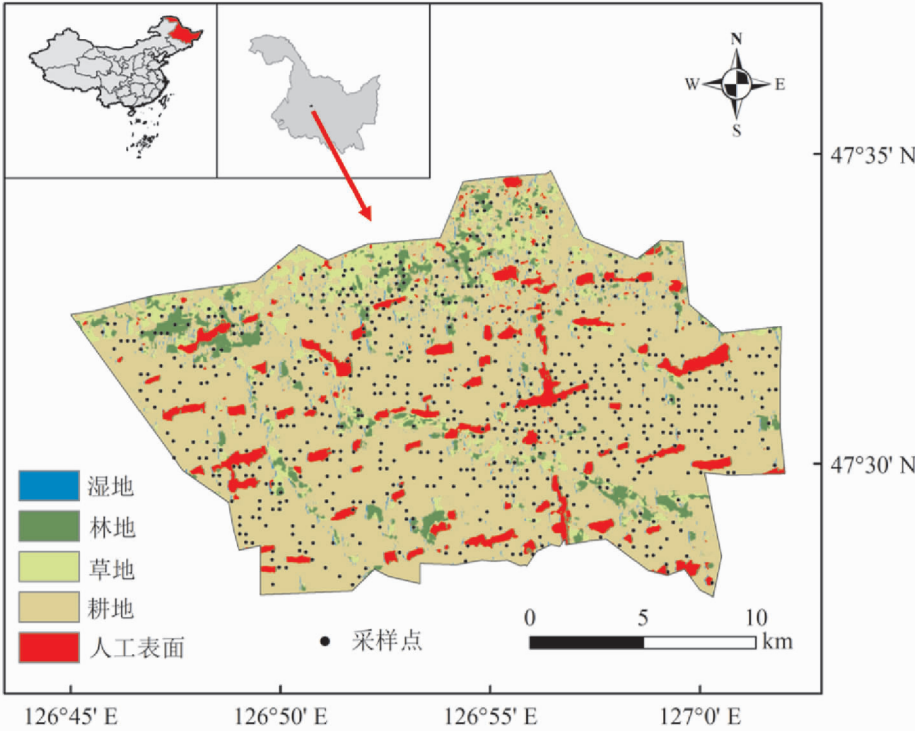


图 1 研究区域及采样点位置示意图

Fig. 1 Map of the study area and sampling locations

土壤样品风干后 2 mm 过筛。土壤 pH 值按照标准分析程序测定,土水比为 1: 2.5<sup>[20]</sup>。土壤样品用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 混合液消解,应用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(NexION 300, PerkinElmer) 测量土壤 Cd、Cu、Hg 和 Zn 含量,并应用国家标准土壤样品 GBW07410(黑龙江土壤)进行质量控制。

1.2 土壤功能因子识别

富集因子(EF)如公式(1)所示,定义为土壤重金属含量与参考样品重金属含量除以两者背景值间的比值。EF 用于识别人为活动对自然环境的干扰,EF > 1.5 表示人为干扰显著<sup>[21]</sup>。

$$EF = \frac{\left(\frac{T_i}{T_r}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{T_i}{T_r}\right)_{\text{background}}}$$

(1)

式中: $T_i$  和  $T_r$  分别表示元素  $i$  和参考元素  $r$  的含量; $(T_i/T_r)_{\text{sample}}$  和  $(T_i/T_r)_{\text{background}}$  分别表示样品中的值和背景值。本研究中 Pb 被用作参比元素,因其标准偏差低且变异小(变异系数 = 6.4%),表明其在研究区含量分布均匀且可能与地质背景有关<sup>[6]</sup>。

探索性因子分析(EFAM)是一种潜在变量分析,用于验证所选变量的潜在参数<sup>[22]</sup>。常用的土壤因子解析方法主要通过主成分分析(PCA)将观测变量转化为主要的成分矩阵,而探索性因子分析更注重将观测变量转化为系统的潜在结构(公共因子),使降尺度分析的结果直接与实际结果相关联,而因子旋转则有助于每个变量载荷尽可能地分散到不同的参数之间。EFAM 模型假设变量集  $X$  可通过  $m$  个潜在的随机变量  $F$  来描述变量间的协方差关系,并用矩阵形式表示为

$$X = \mu + AF + \varepsilon = \mu + (AT)(T'F) + \varepsilon$$

(2)

式中: $X = (X_1 + X_2 + \cdots + X_n)'$  为变量集; $E(X) = \mu$ ;  $F = [F_1, F_2, \cdots, F_m]'$  为公共因子,  $m$  为潜在的随机变量个数;  $A$  为  $n \times m$  的因子载荷矩阵,  $\varepsilon_i = \Sigma - A_i A_i'$  为特殊因子,代表公共因子无法解释的部分(相当于多元线性回归模型中的残差)。在 EFAM 模型中,为了使每个变量的载荷尽可能分散到不同的公共因子中,使用正交变换旋转因子,  $T$  为任意正交矩阵。

在正交因子模型的假设下,通过正交分解方法可对因子载荷的未知参数进行有效估计:

$$\begin{cases} \Sigma = e_i \lambda e_i' \\ A_i = (e_1 \sqrt{\lambda_1}, \dots, e_m \sqrt{\lambda_m}), (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Sigma$ 是 $X$ 协方差矩阵,由公共因子贡献的共性和特殊因子贡献的特殊性方差组成。 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ 为特征根, $e_1, e_2, \dots, e_n$ 为相应的特征向量。 $A_i$ 表示每个变量相对于每个公共因子都有一个分值,这样就可以比较不同因子单元的数据载荷和权重。

本研究土壤理化性质数据集包含 859 个样本,由 10 个属性和 5 种重金属组成,其余 6 个理化性质因其与主要变量的相关性较弱(Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)  $\leq 0.6$ )而排除。应用 EFAM 对选定的数据集  $X$  进行分析,确定关键土壤因子进而揭示属性之间的交互关系。在此基础上结合富集因子开展情境分析,使用验证性因子分析模型检验每个潜在土壤参数的保留变量,并使用均方根误差评估模拟精度。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤因子变异特征

研究区主要土壤理化性质如图 2 所示。区域土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全硫(S)、全磷

(TP)、总钾(K)和有效磷(AP)均值分别为 5.5%、2.6 g · kg<sup>-1</sup>、0.41 g · kg<sup>-1</sup>、0.98 g · kg<sup>-1</sup>、21 g · kg<sup>-1</sup>和 32 mg · kg<sup>-1</sup>。土壤有机质(SOM)和有效磷(AP)是量化土壤养分的关键指标<sup>[23-24]</sup>。研究区 SOM 和 AP 平均值分别为 5.5% 和 32 mg · kg<sup>-1</sup>。较高的 SOM 含量与我国东北地区黑土养分相关研究结果较为一致,表明区域黑土肥沃,养分充足。区域 AP 含量变异较大,范围从 2 ~ 248 mg · kg<sup>-1</sup>,变异系数高达 68%。土壤 AP 的高变异性可能受成土母质及人为农业活动影响<sup>[25]</sup>,特别是长期施用过量磷肥补充土壤 AP<sup>[26]</sup>。说明该地区存在土壤 P 缺乏和磷肥过量施用的状况。

区域土壤重金属含量变化水平如图 2 所示。由图 2 可知,研究区土壤 Hg、Cd、Cu、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.04、0.11、25、23、69 mg · kg<sup>-1</sup>,均超过了相应的区域土壤重金属背景值。其中土壤 Cd 变异系数(44%)显著高于其他重金属元素,且部分区域土壤 Cd 含量(0.67 mg · kg<sup>-1</sup>)超过农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018<sup>[27]</sup>, 0.6 mg · kg<sup>-1</sup>)。可见研究区土壤 Cd 含量存在显著的空间变异和点源污染。根据单一变量平均值的高低评估区域土壤养分或污染现状存在一定的不确定性。

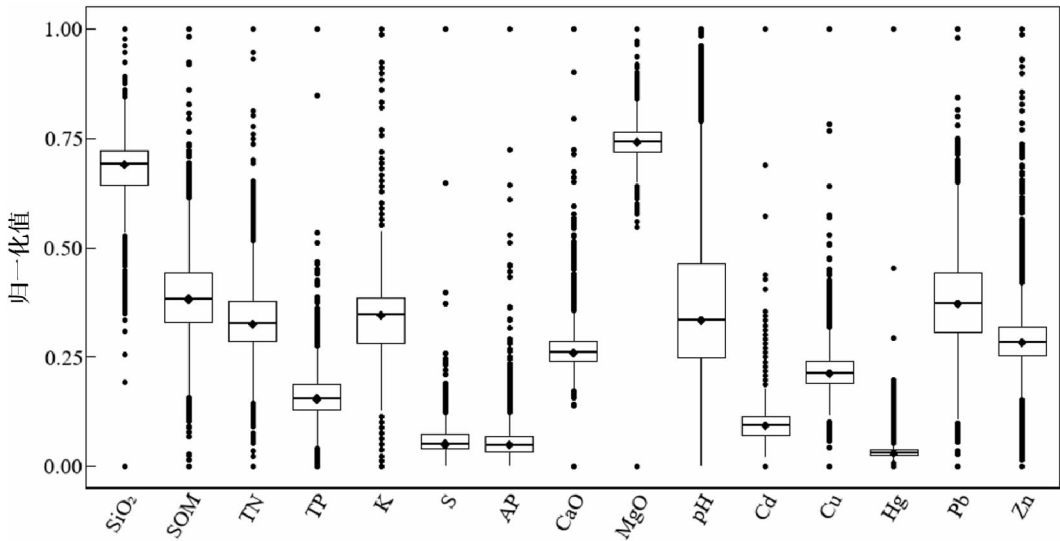


图 2 研究区土壤理化性质变异特征

Fig. 2 The statistical descriptive of measured physico-chemical attributes of soils

### 2.2 权衡关系

构建因子探索模型(EFAM)解析土壤功能养分与土壤重金属 Cd 累积的权衡关系,因子旋转后获得 3 个土壤因子(EFAM1-EFAM3)(见图 3)。

其中 EFAM1(方差贡献率 39%)关联土壤养分相关变量,表现为对土壤有机质(SOM, 0.86)、全氮(TN, 0.86)、全硫(S, 0.75)和全磷(TP, 0.73)的高载荷。EFAM3(方差贡献率 31%)关联土壤

缓冲变量,表现为对 pH(0.79)、CaO(0.67)、MgO(0.72)及 SiO<sub>2</sub>(-0.71)的高载荷,这些变量与土壤酸碱性、吸附性和渗透性显著相关<sup>[14,28]</sup>,说明 EFAM3 反映了区域质地属性。与其他两个因子不同,EFAM2(方差贡献率 30%)同时关联了土

壤肥力变化与重金属累积两个过程的相关变量。其中,土壤肥力变化表现为对 AP(0.7)和 K(0.44)的高载荷,重金属累积主要表现为对 Cd(0.49)、Hg(0.53)和 Zn(0.55)的高载荷。

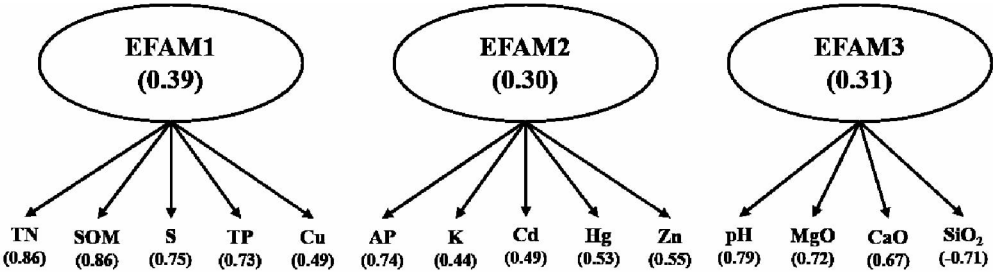
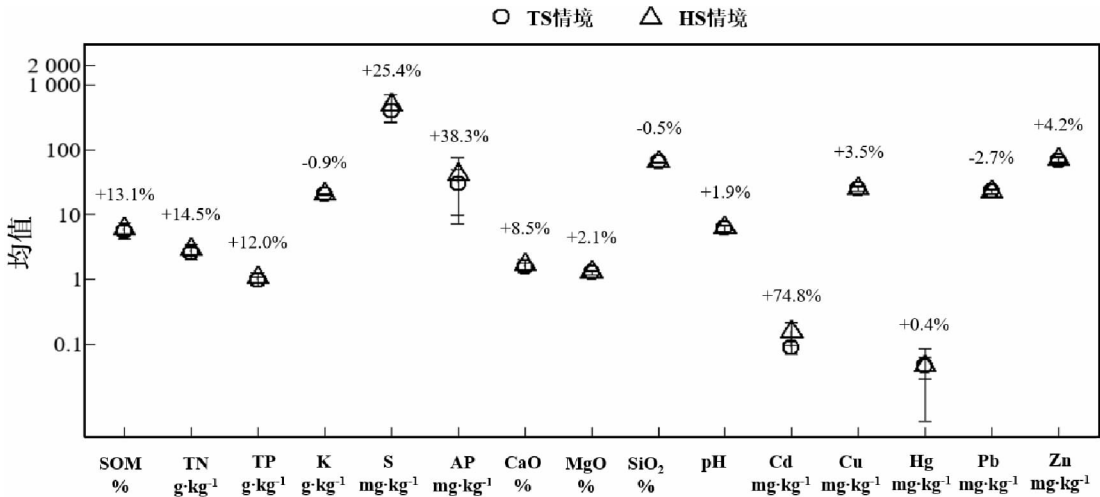


图 3 基于 EFAM 分析的区域土壤因子交互关系

Fig. 3 Interaction relationship of regional soil factors based on EFAM analysis

应用富集因子[EF,公式(1)]对区域土壤样品进行分组,进一步探索高强度农业情境(HS,EF≥1.5)和传统农业情境(TS,EF<1.5)下的土壤功能因子变化特性。由图 4 可知,在 HS 和 TS 情境下,EFAM1(有机质)和 EFAM3(土壤质地)相关变量差异较小,而 EFAM2 对应的变量变化显著,HS 情境下 TP 和 AP 较 TS 情境下分别增加了 12.0%和 38.3%。研究区地势较为平坦(见图 1),

土壤 AP 变异性强(见图 2),因此,可以进一步确定研究区土壤 P 变异与区域磷肥应用高度相关。HS 情境下土壤 Cd 含量相对 TS 情境显著增加了 74.8%。磷肥作为一种矿物肥料,是区域农田土壤 Cd 持续输入的主要来源之一<sup>[29]</sup>。研究进一步说明了区域土壤 Cd 累积与磷肥施用的高相关性。



注:百分比表示 HS 相对于 TS 变化的幅度。

图 4 TS 和 HS 情境下的土壤理化性质差异

Fig. 4 Variations in the physico-chemical factors of soils belong to TS and HS scenario

2.3 权衡关系及情境模拟

参考国家相关标准(DZ/T 0295—2016<sup>[30]</sup>)和文献报道<sup>[31]</sup>,区域土壤有效 P 可分为过低(AP1,0~20 mg·kg<sup>-1</sup>),最佳(AP2,20~40 mg·kg<sup>-1</sup>)和盈余(AP3,>80 mg·kg<sup>-1</sup>)等 3 种类别。由此进一步开展区域土壤 P-Cd 交互关系

情境模拟(见图 5),结果显示与 AP2 相比,AP3 情境下土壤 Cd 累积分布左移,土壤 Cd 含量 90% 估计值增加 1.4 倍,可见土壤 Cd 含量显著升高,即长期磷肥超量施用的地区更容易发生土壤 Cd 累积。

进一步开展多情境长期模拟,以评估不同磷

肥施用强度在 50 年内对区域土壤 Cd 累积水平的影响,研究结果如图 6 所示。其中,情境 I 和情境 III 分别代表 TS 和 HS 情境下的土壤 AP 最佳水平,情境 II 和情境 IV 分别代表 TS 和 HS 情境下的土壤 AP 盈余水平。结果显示在 TS 情境下,土壤 Cd 含量变化随时间逐步增加,但 90% 的土壤 Cd 略高于背景值,土壤 Cd 增幅小且污染风险较低。在土壤 AP 盈余水平下,HS 和 TS 情境中土壤 Cd 含量增加趋势明显,其中 TS 情境下土壤 Cd 含量在 50 年内由 0.15 mg · kg<sup>-1</sup> 上升到 0.32 mg · kg<sup>-1</sup>,而 HS 情境下土壤 Cd 含量在 50 年内由 0.17 mg · kg<sup>-1</sup> 增加到 0.40 mg · kg<sup>-1</sup>,均超过了农田土壤 Cd 污染风险水平(0.3 mg · kg<sup>-1</sup>,GB 15618—2018<sup>[27]</sup>)。可见保持土壤 AP 最佳水平是控制区域土壤 Cd 污染风险的关键一环。

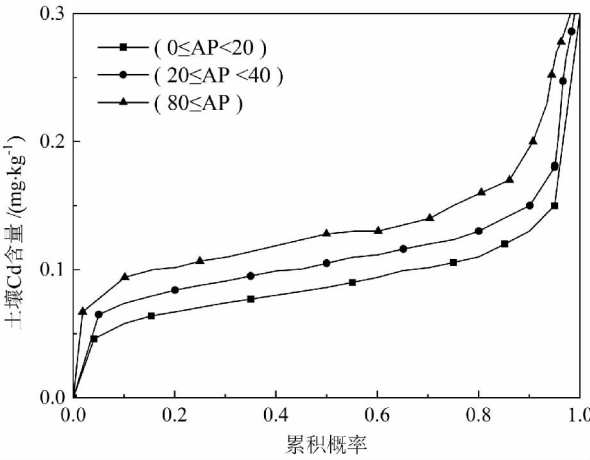


图 5 土壤中不同磷肥施用水平下的土壤 Cd 含量累积概率分布

Fig. 5 Cumulative probability distributions of cadmium (Cd) concentrations in soils with different available phosphorus levels

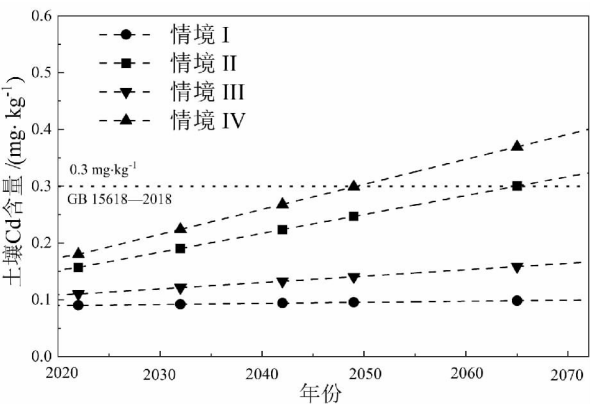


图 6 不同情境下土壤 Cd 含量变化趋势模拟

Fig. 6 Simulated changes in the cadmium (Cd) concentrations of soils over a 50-year period in response

### 3 讨论

本研究将探索性因子分析方法(EFAM)与情境模拟相结合,提出了一种同时量化“土壤肥力提升”和“重金属累积风险”的评估方法,并在区域土壤 P-Cd 交互关系解析中成功验证。

EFAM 解析出的 3 个主导因子分别反映了土壤养分积累(EFAM1)、土壤质地与缓冲属性(EFAM3)以及养分-重金属交互过程(EFAM2)。其中,EFAM1 主要由有机质(SOM)、全氮(TN)、全硫(S)和全磷(TP)等指标组成,表明土壤有机质是调控区域养分循环和可利用性的核心变量,这一结果印证了 SOM 作为肥力维持与养分转化“源动力”的作用,与东北黑土肥沃特征高度一致<sup>[23]</sup>。

EFAM3 与 pH、CaO、MgO 和 SiO<sub>2</sub> 等指标密切相关,反映了区域土壤质地和缓冲能力。EFAM2 同时关联了有效磷(AP)、钾(K)等土壤养分与 Cd、Hg 等重金属,揭示了农业活动下养分积累与重金属输入的权衡效应。情境模拟结果进一步说明,高强度农业(HS)情境下,土壤 TP 和 AP 分别提升 12.0% 和 38.3%,而土壤 Cd 含量增加 74.8%。近年来我国东北地区为维持土壤养分磷肥增施趋势明显。然而,磷肥富 Cd 水平显著高于其他化肥,而我国东北黑土区土壤 Cd 的富集系数 BCF(0.60)显著高于其他元素<sup>[32]</sup>,即磷肥施用也增加了区域土壤 Cd 累积和农作物 Cd 富集风险。

交互关系模拟显示,在土壤有效磷处于盈余水平时,Cd 含量显著升高,分布概率曲线整体左移。在土壤有机质较高的环境下,P 倾向于与金属离子/有机质结合形成稳定的有机 P 复合物,部分地区有机 P 甚至达到 TP 的 50%<sup>[33]</sup>。农作物不能有效利用有机 P 复合物,因此需要额外施加磷肥以提升土壤 P 有效性<sup>[26,34]</sup>。Jiao 等通过分析加州农田土壤 1 000 多个土壤样本中的 Cd 和 P 含量发现,大量施用磷肥后土壤 Cd 含量成比例增加<sup>[35]</sup>。长期模拟结果进一步验证了上述推论。在 50 年尺度的情境下,土壤 AP 处于盈余水平的区域,无论是 HS 还是 TS 情境,Cd 累积均超过了农田土壤污染风险阈值(0.3 mg · kg<sup>-1</sup>)。相比之下,在 AP 最佳水平下,Cd 积累缓慢且风险可控。如何在保障土壤 P 高效利用的情况下

避免 Cd 持续累积是实现区域农田土壤可持续安全利用的关键。

东北黑土区环境体系复杂,土壤 P-Cd 关系涉及跨尺度、多形态、多因素交叉作用的非线性耦合过程,受到土壤 pH、有机质、根际有机酸和微生物等多种因素影响。未来的研究中,对多环境要素长时段监测结果的考量,有助于提升探索性因子分析模型模拟结果的准确性,并加深对土壤污染过程的系统性了解。对气候变化(如降水模式改变)、农业管理措施(轮作制度、有机肥替代)与区域发展规划等因素的综合考虑,可进一步拓展模型应用范围,并为区域土壤污染防治策略的精准制定提供决策建议。此外,虽然这项研究的重点是土壤 P-Cd 交互特性,但其他污染物(如铅或汞)与 Cd 也存在较强相关性,对 Cd-其他污染物-土壤理化因子三元体系交互关系的深入有待进一步加强。

4 结语

本研究通过探索性因子模型和情境模拟解析了区域土壤养分与重金属累积的权衡关系。结果表明,可以根据 3 个土壤功能因子来识别主导不同环境变量的关键过程,分别为土壤养分、土壤质地和农业活动。研究发现,土壤有效养分的提升与施肥导致的 Cd 累积存在显著权衡关系。施肥有助于提升土壤磷活性,但过量和不均衡的施肥会对环境产生负面影响,长期过量施磷肥会显著增加 Cd 富集风险。在 50 年尺度上,保持土壤最佳磷水平( $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )对土壤 Cd 的累积影响较小。多维度数据、农业管理措施和区域发展规划的融合有助于降低模型分析过程中的不确定性,提升区域农田土壤保护决策的科学性,在提升土壤养分的同时降低区域土壤污染风险。

参考文献

[1] CAI S Y, ZHAO X, PITTELKOW C M, et al. Optimal nitrogen rate strategy for sustainable rice production in China[J]. *Nature*, 2023, 615(7950): 73-79.

[2] FUREY G N, TILMAN D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(49): e2111321118.

[3] LI H, YANG Z L, DAI M W, et al. Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China

during 2006—2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134149.

[4] WITHERS P J A, SYLVESTER-BRADLEY R, JONES D L, et al. Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(12): 6523-6530.

[5] LIU D T, SONG C C, XIN Z H, et al. Spatial patterns and driving factor analysis of recommended nitrogen application rate for the trade-off between economy and environment for maize in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116099.

[6] 包立旭, 姜杰, 孙国新. 黑龙江省黑土区土壤重金属污染及风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2024(4): 205-216.

BAO L X, JIANG J, SUN G X. Soil heavy metal pollution and risk evaluation in black soil areas of Heilongjiang Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024(4): 205-216.

[7] SHI T R, ZHANG Y Y, GONG Y W, et al. Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975—2016): From temporal and spatial variations to risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2019, 230: 136-143.

[8] DEMAY J, RINGEVAL B, PELLERIN S, et al. Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(1): 69-74.

[9] HUSSAIN B, UMER M J, LI J M, et al. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125557.

[10] LUO W X, YANG S N, KHAN M A, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice with water management and calcium-magnesium phosphate fertilizer in field environment[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(11): 3877-3886.

[11] WU J W, LI R J, LU Y, et al. Sustainable management of cadmium-contaminated soils as affected by exogenous application of nutrients: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113081.

[12] GAO B B, YANG J Y, CHEN Z Y, et al. Causal inference from cross-sectional earth system data with geographical convergent cross mapping[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5875.

[13] ZHAO W H, MA J, LIU Q Y, et al. Accurate prediction of soil heavy metal pollution using an improved machine learning method: A case study in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science &*

- Technology, 2023, 57(46): 17751-17761.
- [14] LU J H, JIANG P P, WU L S, et al. Assessing soil quality data by positive matrix factorization[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 259-266.
- [15] GIBBONS J M, WILLIAMSON J C, WILLIAMS A P, et al. Sustainable nutrient management at field, farm and regional level: Soil testing, nutrient budgets and the trade-off between lime application and greenhouse gas emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 48-56.
- [16] BREURE T S, ESTRADA-CARMONA N, PETSAKOS A, et al. A systematic review of the methodology of trade-off analysis in agriculture[J]. *Nature Food*, 2024, 5(3): 211-220.
- [17] 杜晓芳, 李英滨, 白杨, 等. 基于探索性因子分析的土壤生物健康评价[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(12): 3497-3506.
- DU X F, LI Y B, BAI Y, et al. Soil biological health assessment based on exploratory factor analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3497-3506.
- [18] SCHREIBER J B. Issues and recommendations for exploratory factor analysis and principal component analysis[J]. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, 2021, 17(5): 1004-1011.
- [19] FAO. World reference base for soils resources[M]. Rome: FAO, 1998.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [21] TOMCZYK P, WADOWCZYK A, WIATKOWSKA B, et al. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111161.
- [22] MARTIN T, WADE J, SINGH P, et al. The integration of nematode communities into the soil biological health framework by factor analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108676.
- [23] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality: A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.
- [24] HE H, PENG M W, LU W D, et al. Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158132.
- [25] LANGHANS C, BEUSEN A H W, MOGOLLÓN J M, et al. Phosphorus for sustainable development goal target of doubling smallholder productivity[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(1): 57-63.
- [26] TIAN L Y, GUO Q J, YU G R, et al. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124622.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [28] MEUNIER J D, SANDHYA K, PRAKASH N B, et al. pH as a proxy for estimating plant-available Si? A case study in rice fields in Karnataka (South India)[J]. *Plant and Soil*, 2018, 432(1): 143-155.
- [29] ZHUANG Z, MU H Y, FU P N, et al. Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soil and scenario analysis of cadmium inputs by fertilization: A case study in Quzhou county[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269: 110797.
- [30] 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: 地质出版社, 2016.
- [31] DODD J R, MALLARINO A P. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1118-1128.
- [32] PENG M, ZHAO C D, MA H H, et al. Heavy metal and Pb isotopic compositions of soil and maize from a major agricultural area in Northeast China: Contamination assessment and source apportionment[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 208: 106403.
- [33] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 等. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 85-89.
- WANG Y L, WANG J, ZHAO L P, et al. Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 85-89.
- [34] IMSENG M, WIGGENHAUSER M, KELLER A, et al. Fate of Cd in agricultural soils: A stable isotope approach to anthropogenic impact, soil formation, and soil-plant cycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1919-1928.
- [35] JIAO W T, CHEN W P, CHANG A C, et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168: 44-53.

作者简介



杨阳,男,博士,中国科学院生态环境研究中心副研究员,硕士生导师。主要从事土壤污染过程模拟和风险评估研究,在 *Journal of Agricultural and Food Chemistry*、*Journal of Hazardous Material*、*Environmental Pollution* 等国际期刊发表文章 50 余篇,授权发明专利 9 项,软件著作权 5 项。主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发项目子课题、中国科学院先导科技专项子课题等项目 20 余项,入选中国科协青年人才托举工程、中国科学院青年创新促进会和国家重点实验室马世骏青年人才计划,荣获广东省环境技术进步奖一等奖。