

## 陕西省韩城市土壤碘含量空间分布与影响因素<sup>①</sup>

喜俊生<sup>1,2,3</sup>, 李新斌<sup>1,3\*</sup>, 康成鑫<sup>1,3</sup>, 赵子豪<sup>1,3</sup>, 张 姚<sup>1,3</sup>, 刘 林<sup>1,3</sup>, 王 博<sup>1,3</sup>, 张 猛<sup>2</sup>

(1 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100; 2 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710054; 3 秦岭-黄土高原过渡带水土要素耦合与生物资源保育野外观测研究站, 陕西潼关 714300)

**摘要:** 通过检测陕西省韩城市不同深度(表层 0~20 cm、中层 20~60 cm、深层 60~100 cm)土壤样品碘元素含量, 分析了不同土壤类型、不同地形坡度、不同土地利用类型土壤的碘含量水平, 对研究区土壤碘空间分布与影响因素进行了研究。结果表明: ①韩城市表层土壤碘含量相对于中层、深层土壤更加富集; 表层、中层、深层土壤碘平均含量均处于适宜水平, 土壤碘含量远低于全国土壤碘背景值, 整体属于低碘地区, 没有高碘区域。②不同土壤类型间, 土壤碘含量差异不大。③不同地形坡度下, 土壤碘含量随着地形坡度增大而降低, 特别地, 地形坡度超过 6°~15° 时, 碘含量下降率陡增。④不同土地利用类型下, 表、中、深层土壤碘含量最高均为水浇地, 表层最低的是旱地, 中、深层最低的是草地。值得注意的是, 草地表层土壤碘含量是中层的 2.8 倍, 是深层的 8.5 倍, 呈现断崖式下降。⑤韩城市表层土壤碘含量整体属于适量-边缘范围; 中、深层土壤在低-中山区与河流阶地区普遍属于碘缺乏, 而在南部黄土台塬区与北部低山丘陵区整体上属于边缘范围。

**关键词:** 韩城市; 土壤碘; 空间分布; 影响因素

**中图分类号:** P962    **文献标志码:** A

## Spatial Distribution and Influencing Factors of Soil Iodine Content in Hancheng City, Shaanxi Province

XI Junsheng<sup>1,2,3</sup>, LI Xinbin<sup>1,3\*</sup>, KANG Chengxin<sup>1,3</sup>, ZHAO Zihao<sup>1,3</sup>, ZHANG Yao<sup>1,3</sup>, LIU Lin<sup>1,3</sup>, WANG Bo<sup>1,3</sup>, ZHANG Meng<sup>2</sup>

(1 Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710100, China; 2 School of Human Settlements and Architectural Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 3 Field Observation and Research Station of Soil and Water Elements Coupling and Biological Resources Conservation in Qinling-Loess Plateau Transition Zone, Tongguan, Shaanxi 714300, China)

**Abstract:** By measuring soil iodine content at different depths(surface soil, 0–20 cm; middle soil, 20–60 cm; deep soil, 60–100 cm) in Hancheng City, Shaanxi Province, soil iodine content levels of different soil types, different terrain slopes and different land use types were analyzed and compared, and the spatial distribution and influencing factors of soil iodine content were studied. The results showed that: 1) Iodine was more enriched in surface soil than in middle and deep soils. Average iodine contents in surface, middle and deep soils were all at the appropriate level, and soil iodine content was much lower than the national soil iodine background value, thus, Hancheng City belonged to the low soil iodine area without high iodine area. 2) No significant difference was found in soil iodine contents among different soil types. 3) Under different topographic slopes, soil iodine content decreased with the increase of topographic slope, particularly, when the topographic slope exceeded 6°–15°, the decrease rate of iodine content increased sharply. 4) Among different land use types, irrigated land had the highest iodine content in surface, middle and deep soils, dry land had the lowest iodine content in surface soil, and grassland got the lowest iodine content in middle and deep soils. It is worth noting that the iodine content of the surface soil in the grassland was 2.8 times of the middle soil and 8.5 times of the deep soil, showing a cliff-like decline. 5) Iodine content in the surface soil of Hancheng City belonged to the moderate-marginal range. In the middle and deep soil, the low-middle mountain area and river

<sup>①</sup>基金项目: 中国地质调查局项目(DD20242461; DD20242563; DD20230800209)资助。

\* 通信作者(825416301@qq.com)

作者简介: 喜俊生(1992—), 男, 甘肃定西人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为自然资源综合调查、土壤质量评价。

E-mail: xijunsheng2024@163.com

terrace were generally iodine deficient, while the southern loess tableland and the northern low hill area belonged to the marginal range.

**Key words:** Hancheng City; Soil iodine; Spatial distribution; Influencing factor

碘是动物和人体的必需元素之一, 是合成甲状腺激素的重要成分, 高碘或低碘均能引起人类或动物的各种疾病<sup>[1-3]</sup>, 如甲亢与甲状腺瘤均与碘摄入过量密切相关, 而碘摄入不足, 也会导致一系列疾病, 如甲状腺肿大等碘缺乏病<sup>[4]</sup>。医学研究表明, 碘主要通过调节甲状腺激素来影响动物和人体的生长发育, 碘也与人体的智力发育密切相关, 被人们称为“智力元素”<sup>[5]</sup>。土壤是人类赖以生存的物质基础, 为人类提供了生存栖息之地, 也为地球上所有的生物群体提供了生存的环境。土壤中碘的行为及其迁移转化与人体健康密切相关<sup>[6]</sup>。土壤碘含量与形态直接影响着植物对碘的吸收, 进而通过食物链影响人类健康。尽管人类早已认识到碘对人体和动物健康的重要性, 但由于环境样品中碘的分析测定比较困难, 环境中碘的行为及碘在土壤中的迁移与积累研究一直进展缓慢<sup>[7-9]</sup>。

随着现代工农业的飞速发展与人类活动的增加, 土地利用、地形坡度发生了显著变化, 有可能造成土壤中碘的空间分布发生变化。因此, 本研究以陕西省韩城市土壤为例, 探究了不同土壤类型、不同地形坡度、不同土地利用类型下不同深度土壤的碘含量水平与空间分布, 以查明影响土壤碘含量水平的地质环境因子, 从地缘因素出发, 为碘缺乏病防治提供理论依据和数据支撑, 助力当地的经济和社会科学发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

韩城市隶属于陕西省渭南市, 地处关中平原东北部, 西靠延安市黄龙县, 北接宜川县, 南临渭南市合阳县, 东隔黄河与山西省运城市河津市、万荣县、临汾市乡宁县相望, 地理位置  $110^{\circ}07'19''E \sim 110^{\circ}37'24''E$ ,  $35^{\circ}18'50''N \sim 35^{\circ}52'08''N$ 。该市东西宽约 42.2 km, 南北长约 50.7 km, 总面积 1 621 km<sup>2</sup>, 属暖温带半干旱大陆性季风气候区, 常年气候温和、日照充足, 年平均气温 13.5℃, 年平均降水量 559.7 mm, 但由于降雨多集中在 7—9 月, 春季易发生干旱, 而夏季降雨量大且多, 水土流失比较严重。

韩城市地势西北高、东南低。西部深山多为梁状山岭, 一般海拔 900 m 以上, 韩(城)黄(龙)分界处的大岭海拔 1 788 m, 为该市全境最高点; 中部浅山区多为黄土丘陵, 海拔 600 ~ 900 m; 东部黄土台塬一

般海拔 400 ~ 600 m, 潼水下游川道和黄河滩地海拔多在 400 m 以下, 其中市南的芝川口海拔 357 m, 为全市陆面最低处。区内黄河支流均源于黄龙山地, 呈西北—东南向流经该区, 其中潼水、芝水、盘河较大, 具常流水, 其余均较小, 呈季节性河。总体上, 研究区大致自西北向东南依次出现基岩低中山、低山丘陵、黄土台塬及河流阶地 4 种地貌类型。

调查发现<sup>[10]</sup>, 韩城市土壤类型主要有黄绵土、褐土、粗骨土、钙质石质土、红黏土、壤土、冲积土等。根据 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》<sup>[11]</sup>, 韩城市土地利用类型一级分类主要有耕地、园地、林地、草地、商服用地、公共管理与公共服务用地、交通运输用地、水域及水利设施用地等 12 类; 二级分类中耕地主要有水浇地、旱地等, 园地主要有果园、其他园地等, 林地主要有乔木林地、灌木林地等, 草地主要有沼泽地及其他草地等。本研究在土地利用分类时, 耕地采用二级分类, 园地、林地、草地采用一级分类。

### 1.2 样品采集与测试

于 2022 年 6—8 月在陕西省韩城市布设 121 个表层取样点, 采集表层土样 121 件, 中层、深层土样分别各 69 件, 基本覆盖韩城市全域。采样点如图 1 所示。

样品采集采取多点采样方式, 如“X”形、“S”形或棋盘形, 取土工具选取不锈钢取土钻。采样点以农业用地土壤为主, 林地、草地为辅。在采样点上, 使用 GPS 定位, 确定主样点, 并向四周 30 ~ 50 m 辐射确定 3 个分样点。采集样品时, 用木铲除去表面的腐殖质与枯枝落叶, 避开无代表性地块如沟渠、路边、田埂等有明显生活垃圾的地块, 分别采集表层 (0 ~ 20 cm)、中层 (20 ~ 60 cm)、深层 (60 ~ 100 cm) 土壤样品。将不同层位分样点土样倒在保鲜膜上, 用橡胶锤敲碎, 挑出植物根系与石块等杂物, 充分混合均匀后, 用四分法留取 1 ~ 1.5 kg 装入干净样品袋。采集同时, 记录样点地理位置、植被类型、土地利用类型、土壤类型, 同时将现场测定的其他指标等信息拍照记录并做好标记。

取回的土壤样品在室内经自然风干后, 使用橡胶锤敲碎, 再用 20 目尼龙筛过筛去除杂物后, 取 500 g 以上土样封存于 PVC 塑料广口瓶中, 送往中国冶金地质总局西北地质勘查院酒泉测试中心, 化验分析碘

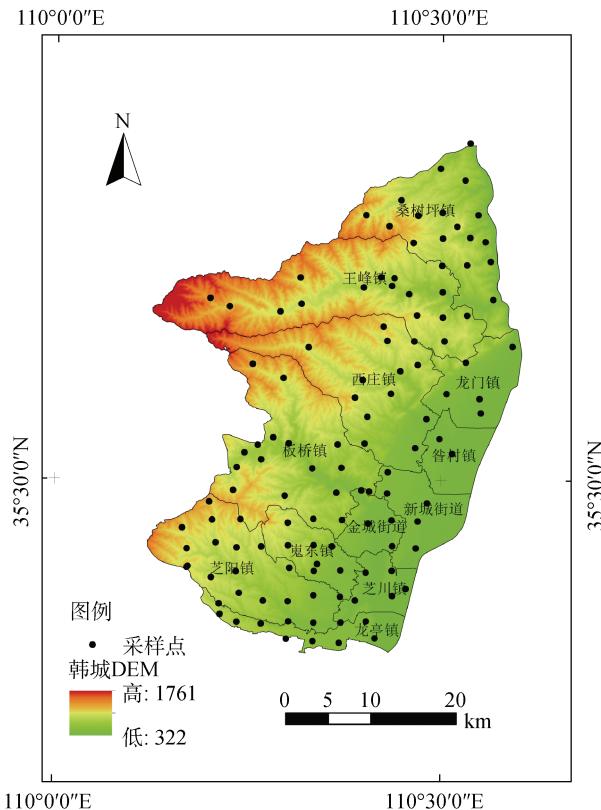


图 1 韩城市采样位置图

Fig. 1 Location of Hancheng City and sampling sites

含量。碘元素的检测采用电感耦合等离子体质谱法，并采用重复样对照以及国家一级标准物质进行质量控制。检测数据的精密度、准确度、报出率及合格率均达到 100%。检测过程中的质量控制参照 DZ/T 0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1 : 25 0000)》<sup>[12]</sup>、DD2005-03《生态地球化学评价样品分析方法和技术要求》<sup>[13]</sup>执行。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2021 以及 SPSS 27.0 软件进行数据的处理和统计分析，碘含量统计特征图使用 Origin 2018 软件制作，采样点位置图及碘含量空间分布图

使用 ArcGIS 10.8 软件制作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碘元素描述性统计特征

韩城市土壤碘含量统计特征表明(表 1)，表层土壤碘含量范围为 0.58 ~ 3.69 mg/kg，算术平均值为 1.85 mg/kg，几何平均值为 1.79 mg/kg，中值为 1.82 mg/kg，变异系数为 24.26%；中层土壤碘含量范围为 0.61 ~ 3.21 mg/kg，算术平均值为 1.69 mg/kg，几何平均值为 1.63 mg/kg，中值为 1.73 mg/kg，变异系数为 26.05%；深层土壤碘含量范围为 0.19 ~ 2.71 mg/kg，算术平均值为 1.62 mg/kg，几何平均值为 1.51 mg/kg，中值为 1.59 mg/kg，变异系数为 30.69%。

DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》<sup>[14]</sup>将表层土壤中碘元素含量按照丰缺程度分为缺乏( $\leq 1$ )、边缘(1 ~ 1.5)、适量(1.5 ~ 5)、高(5 ~ 100)、过剩(>100)五个等级(单位为 mg/kg)。由此可知，研究区表层、中层、深层土壤中碘含量平均值均处于适量状态，且所有样点均未观测到高碘含量。从表层到中层再到深层土壤，土壤碘含量最大值、平均值均随着采样深度增加而降低，然而变异系数却随着采样深度增加呈上升趋势。比较显示，韩城市表层、中层、深层土壤碘含量平均值均低于全国土壤碘含量背景值<sup>[15]</sup>，且全国表层土壤碘含量平均值为 3.76 mg/kg，中值为 2.20 mg/kg，韩城市土壤碘含量水平远低于全国平均水平，属于低碘地区；陕西省土壤碘的几何均值为 1.61 mg/kg，中值为 2.2 mg/kg<sup>[15]</sup>，相较于陕西省，韩城市土壤碘含量虽均值略高，但中值明显偏低，说明韩城市碘含量水平在陕西省排名靠后。有研究发现，除滨海盐土深层土壤碘含量高于表层土壤外，其余土壤均表现为表层土壤碘含量高于对应的深层土壤<sup>[9, 16]</sup>。值得注意的是，表层土壤中碘含量相对于中层、深层土壤更加富集，这与前人研究结果一致<sup>[9, 16]</sup>。

表 1 韩城市土壤碘含量描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of soil iodine content in Hancheng City

土层	样本数	算术平均值 (mg/kg)	中值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	几何平均 值(mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系 数(%)	全国土壤碘背 景值 <sup>[15]</sup> (mg/kg)
表层	121	1.85	1.82	0.58	3.69	1.79	0.45	24.26	3.76
中层	69	1.69	1.73	0.61	3.21	1.63	0.44	26.05	-
深层	69	1.62	1.59	0.19	2.71	1.51	0.50	30.69	-

### 2.2 不同土壤类型碘含量特征

研究区土壤类型主要有黄绵土、钙质石质土、褐土、壤土、粗骨土以及冲积土等。前人研究表明，土

壤中元素含量受成土母岩类型的影响显著，地质背景是土壤碘分布的主要控制因素之一<sup>[17]</sup>。韩城市不同土壤类型中碘含量统计特征见图 2。由图 2 可知，表

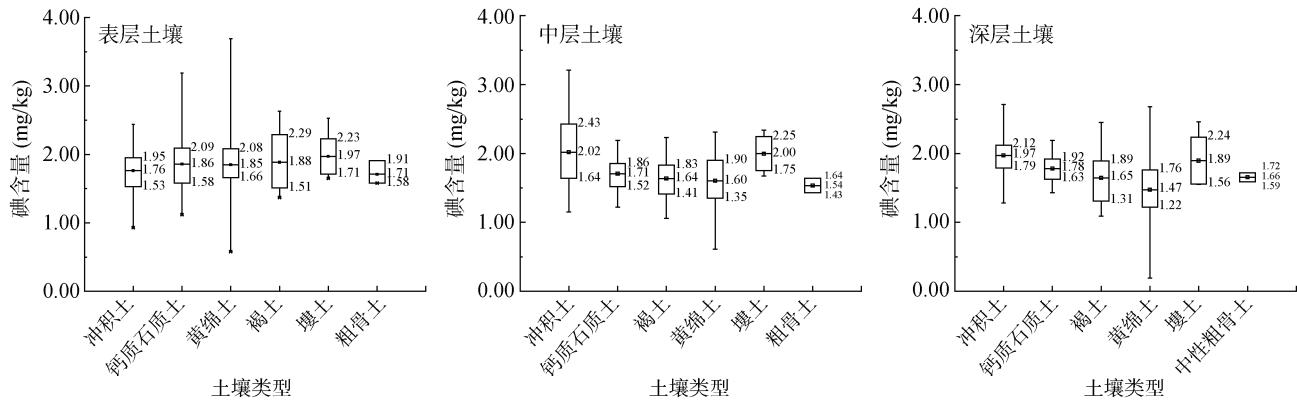


图 2 不同土壤类型碘含量特征  
Fig. 2 Iodine contents of different soil types

层土壤, 不同土壤类型碘含量平均值由高到低分别是 壤土>褐土>钙质石质土>黄绵土>冲积土>粗骨土; 变异系数由高到低依次为钙质石质土>黄绵土>褐土>冲积土>壤土>粗骨土; 中值由高到低依次为黄绵土>壤土>冲积土>褐土>钙质石质土>粗骨土。中层土壤, 不同土壤类型中碘含量平均值由高到低依次为冲积土>壤土>钙质石质土>褐土>黄绵土>粗骨土; 变异系数由高到低依次为冲积土>黄绵土>褐土>钙质石质土>壤土>粗骨土; 中值由高到低依次是壤土>冲积土>钙质石质土>褐土>黄绵土>粗骨土。深层土壤, 不同土壤类型中碘含量平均值由高到低依次为冲积土>壤土>钙质石质土>褐土>粗骨土>黄绵土; 变异系数由高到低依次为黄绵土>褐土>壤土>冲积土>钙质石质土>粗骨土; 中值由高到低依次是冲积土>壤土>钙质石质土>粗骨土>褐土>黄绵土。

本研究结果表明, 研究区同一采样层位, 不同土壤类型间碘元素含量差异不大。表层土壤中, 碘平均含量较高的是壤土、褐土、钙质石质土, 均高于研究区表层土壤碘含量平均值。有研究表明, 土壤中碘的来源, 除了大气沉降、降雨, 人与动物排泄物是其主要来源<sup>[18]</sup>。壤土上层为土粪堆垫层, 下层是风积黄土, 主要分布在关中平原, 而关中平原有着悠久的农耕历史与施用土杂肥的习惯<sup>[19]</sup>, 在局部范围内, 大气沉降、降雨变化并不显著, 因此壤土碘含量高的原因可能与土粪的施用有关。本次调查发现, 研究区褐土分布于碎屑岩区, 钙质石质土分布于碳酸盐岩区, 成土母质主要以残坡积物为主, 上覆植被主要是乔木与多年生灌木, 且褐土与钙质石质土土壤含水率明显高于黄绵土, 因此降雨之后植被具有更强的蓄水功能, 水分蒸发缓慢, 更易于碘的富集。中层、深层土壤中, 碘平均含量较高的均为冲积土、壤土。特别地, 在冲积土中, 土壤碘含量最大值在中层。有关研究显

示, 冰川覆盖过的地区, 土壤碘含量普遍偏低, 主要由于第四纪冰川期冰河溶解, 冰水冲刷, 将富含碘的成熟土壤冲入大海, 新形成的土壤含碘量不足原来的1/10<sup>[20]</sup>。冲积土是由于河流冲积而形成的土壤, 因此冲积土表层土壤碘含量低的主要原因是地质成因。粗骨土土壤砂粒含量较多, 黏粒、粉粒相对较少, 孔隙度较大, 水分容易流失。前人研究表明, 不同类型土壤中, 成土母质、湿度、粒度均对土壤碘含量有明显影响<sup>[17]</sup>。翁焕新等<sup>[21]</sup>在碘的迁移研究中发现, 植物对碘的吸收程度除决定于土壤外源碘的含量外, 还受到土壤质地的影响, 这种影响主要与土壤对外源碘的吸附有关, 土壤颗粒越细, 对外源碘的吸附能力就越强。因此, 在表层、中层土壤中, 粗骨土碘含量低的原因可能是土壤粒度大、含水率低。

### 2.3 不同地形坡度土壤碘含量特征

不同地形坡度土壤碘含量特征如图3所示。在表层土壤中, 当地形坡度 $\leq 2^\circ$ 时, 碘平均含量为1.89 mg/kg, 变异系数为22.86%, 中值为1.90 mg/kg; 当地形坡度为 $2^\circ \sim 6^\circ$ 时, 碘平均含量为1.87 mg/kg, 变异系数为28.96%, 中值为1.74 mg/kg; 当地形坡度为 $6^\circ \sim 15^\circ$ 时, 碘平均含量为1.84 mg/kg, 变异系数为25.59%, 中值为1.82 mg/kg; 当地形坡度为 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时, 碘平均含量为1.57 mg/kg, 变异系数为22.38%, 中值为1.61 mg/kg。可以看出, 随着地形坡度增加, 土壤碘含量平均值、中值均表现为下降趋势。地形坡度为 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、 $6^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时, 其碘含量平均值较上一级地形坡度依次下降了1.1%、1.6%、14.6%; 中值较上一级地形坡度依次下降了8.4%、-4.6%、11.5%。相较于地形坡度 $\leq 2^\circ$ , 地形坡度 $2^\circ \sim 6^\circ$ 时碘含量平均值下降了1.1%, 地形坡度 $6^\circ \sim 15^\circ$ 时碘含量平均值下降了2.6%, 地形坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时碘含量平均值下降了16.9%; 地形坡度 $2^\circ \sim 6^\circ$ 时碘含量

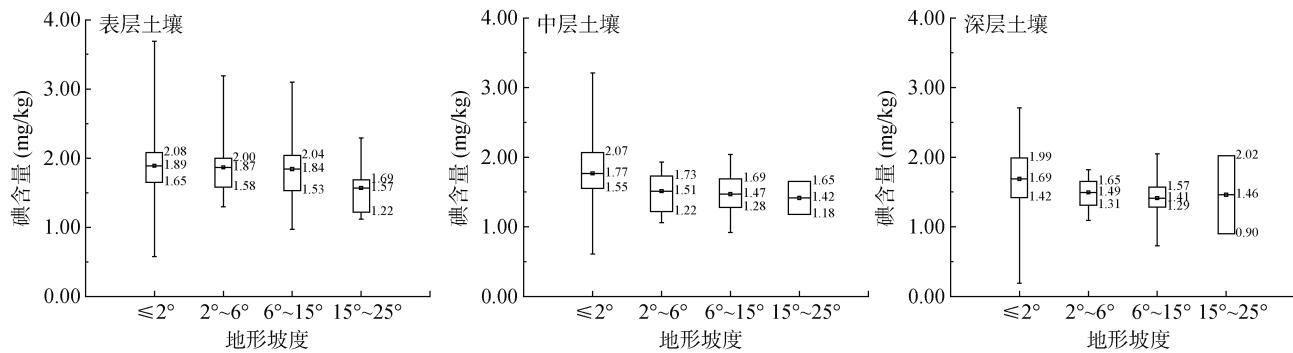


图 3 不同地形坡度土壤碘含量特征  
Fig. 3 Soil iodine contents of different slopes

中值下降了 9.2%，地形坡度  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 4.2%，地形坡度  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 15.3%。

在中层土壤中，当地形坡度  $\leq 2^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.77 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 25.85%，中值为  $1.77 \text{ mg/kg}$ ；当地形坡度为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.51 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 23.93%，中值为  $1.62 \text{ mg/kg}$ ；当地形坡度为  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.47 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 21.16%，中值为  $1.46 \text{ mg/kg}$ ；当地形坡度为  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.42 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 23.49%，中值为  $1.42 \text{ mg/kg}$ 。可以看出，随着地形坡度增加，土壤碘含量平均值、中值均表现为下降趋势。地形坡度为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 、 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时，其碘含量平均值较上一级地形坡度依次下降了 14.6%、2.6%、3.4%；中值较上一级地形坡度依次下降了 8.5%、9.9%、2.7%。相较于地形坡度  $\leq 2^{\circ}$ ，地形坡度  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 14.6%，地形坡度  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 16.9%，地形坡度  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 19.8%；地形坡度  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时碘含量中值下降了 8.5%，地形坡度  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时碘含量中值下降了 17.5%，地形坡度  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时碘含量中值下降了 19.8%。

在深层土壤中，当坡度  $\leq 2^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.69 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 31.50%，中值为  $1.71 \text{ mg/kg}$ ；当坡度为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.49 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 19.48%，中值为  $1.60 \text{ mg/kg}$ ；当坡度为  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.41 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 22.38%，中值为  $1.40 \text{ mg/kg}$ ；当坡度为  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时，碘平均含量为  $1.46 \text{ mg/kg}$ ，变异系数为 54.24%，中值为  $1.46 \text{ mg/kg}$ 。地形坡度为  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 、 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时，其碘含量平均值较上一级地形坡度依次下降了 11.8%、5.4%、-3.5%；中值较上一级地形坡度依次下降了 6.4%、12.5%、-4.3%。相较于地形坡度  $\leq 2^{\circ}$ ，

地形坡度  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 11.8%，地形坡度  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 16.6%，地形坡度  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时碘含量平均值下降了 13.6%；地形坡度  $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时碘含量中值下降了 6.4%，地形坡度  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时碘含量中值下降了 17.5%，地形坡度  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时碘含量中值下降了 14.6%。

本研究结果表明，同一采样层位不同地形坡度对土壤碘含量影响显著。随着地形坡度增加，土壤碘含量平均值呈下降趋势，当地形坡度超过  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  时，土壤碘含量下降率陡增，特别地，在表层土壤中更加显著。前人研究显示，外源引入土壤的碘主要集中在土壤表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )，土壤中碘的淋失量主要决定于土壤对碘的固定能力，而与淋溶水量无关<sup>[22]</sup>。当地形坡度增加时，降雨、土壤侵蚀造成的土壤流失愈发严重，土壤对碘的固定能力必然减弱，因此，地形坡度对土壤碘含量的影响主要还是取决于土壤固碘能力，淋失、蒸发相对来说影响较弱。研究还发现，土壤或植株中的部分碘可以转化为挥发性碘，并释放到空气中，挥发性碘的释放量与碘的含量有关<sup>[23]</sup>。因此，碘含量的降低与土壤和植株的挥发也有一定关系。

#### 2.4 不同土地利用类型土壤碘含量特征

不同土地利用类型中土壤碘含量如图 4 所示。可以看出，在表层土壤中，碘含量平均值由高到低依次为水浇地>草地>园地>有林地>旱地；变异系数由高到低依次为草地>园地>旱地>水浇地>有林地；中值由高到低依次为草地>水浇地>园地>有林地>旱地。在中层土壤中，碘含量平均值由高到低依次为水浇地>有林地>园地>旱地>草地，变异系数由高到低依次为园地>水浇地>旱地>有林地，中值由高到低依次为水浇地>有林地>园地>旱地>草地。在深层土壤中，碘含量平均值由高到低依次为水浇地>旱地>有林地>园地>草地；变异系数由高到低依次为旱地>园地>草地。

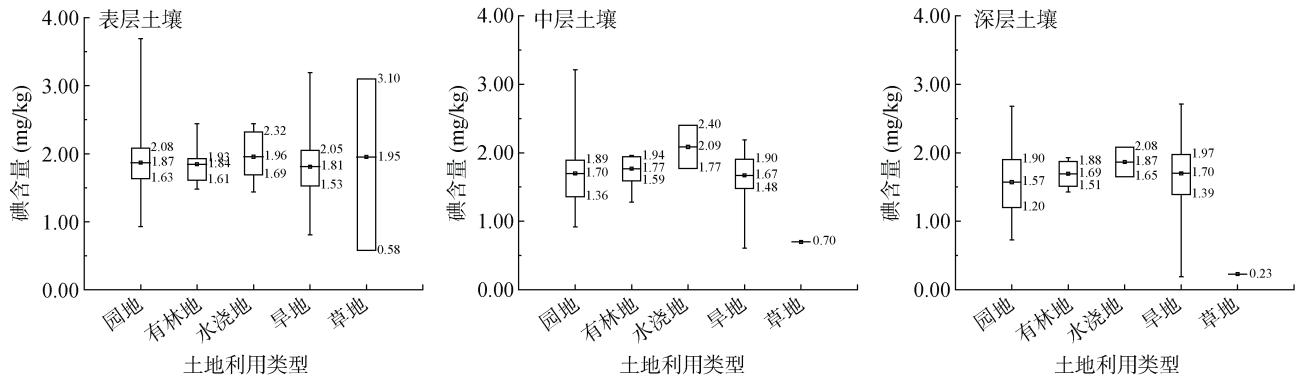


图4 不同土地利用类型土壤碘含量特征  
Fig. 4 Soil iodine contents of different land use types

水浇地>有林地，中值由高到低依次为水浇地>有林地>旱地>园地>草地。

本研究结果表明，研究区不同土地利用类型中，水浇地中碘含量平均值高于其他土地利用类型，园地、有林地、旱地中土壤碘含量差异不明显。宋泽峰等<sup>[24]</sup>研究指出，土壤中碘元素的含量除受到大气降尘、人体排出的碘影响外，灌溉和施肥也会使土壤碘含量升高。灌溉水一般为地表水或地下水，本身含有少量碘。许多钾肥中也含有一定量的碘。因此，水浇地碘含量高可能与灌溉、施肥等活动有密切联系。同一土地利用类型的不同采样层位，水浇地土壤碘平均含量高值出现在中层土壤中。刘晓红等<sup>[25]</sup>对华南地区砖红壤和水稻土剖面中碘的迁移进行研究，结果表明，降雨、灌溉会导致土壤碘随水迁移扩散，在重力作用下随土壤水分向下运移。本研究调查发现，研究区草地土壤相对较薄，而且主要集中于黄河滩地，常年受河水及生物侵蚀，但鱼虾活动密集，植物枯枝落叶层厚，导致土壤表层动植物有机质含量普遍较高，所以草地表层土壤碘含量高，且表层土壤碘含量是中层土壤的2.8倍，是深层土壤的8.5倍，随着土壤深

度增加碘含量急剧下降。秦爱华等<sup>[26]</sup>研究发现，富有机质的土壤碘含量较贫有机质的土壤高，有机质对碘具有较强的吸附能力，在有机质含量与成熟度较低的土壤中，碘含量较低；而在土壤颗粒细小、湿度较大的沼泽土中碘含量明显偏高。吴世汉等<sup>[27]</sup>研究认为，土壤的有机质含量会影响土壤的碘含量，土壤的有机质含量越高，碘含量越高，土壤的碘含量随土壤中的有机质含量增减而增减。而草地深层土壤碘含量低可能是中深层土壤有机质含量低所致。

## 2.5 土壤碘的空间分布特征

为了更加直观地反映土壤碘的空间分布状况，利用ArcGIS10.8中的地统计分析模块采用普通克里金插值法绘制了韩城市土壤碘含量的空间分布图，如图5所示。可以看出，表层土壤碘含量高值区主要在韩城市东部黄河滩地，属于河流阶地区，碘含量低值区主要为西部中山区与东南部漆水下游川道区；中、深层土壤碘含量总体上具有相似的规律，碘含量在南部黄土台塬区和北部低山丘陵区高于西部的低-中山区及东部的河流阶地区。根据DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》<sup>[14]</sup>，韩城市表层土壤碘含

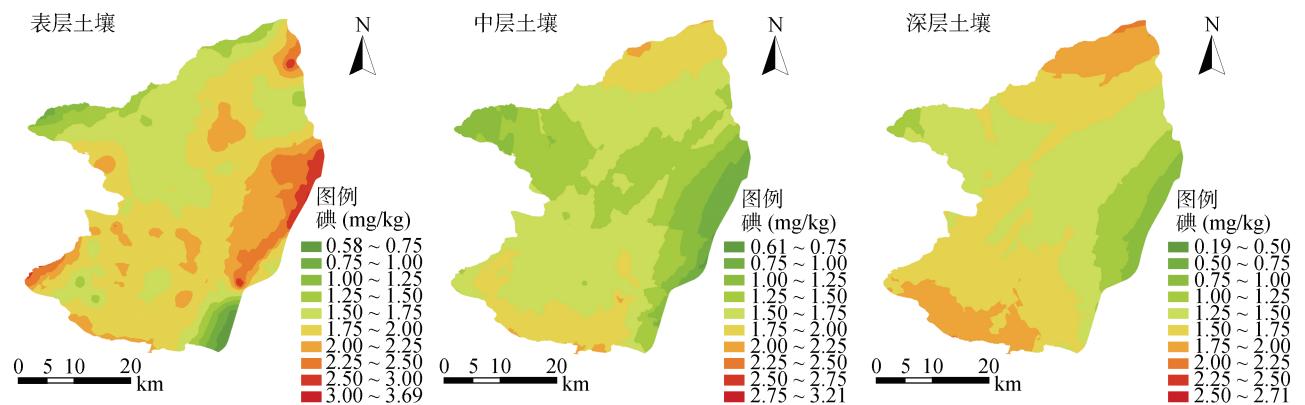


图5 韩城市土壤碘空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of soil iodine content in Hancheng City

量整体属于适量-边缘范围;中深层土壤在低-中山区与河流阶地区普遍属于碘缺乏,而在南部黄土台塬区与北部低山丘陵区整体上属于边缘范围。

### 3 结论

1) 韩城市表层土壤碘含量相对于中层、深层土壤更加富集;表层、中层、深层土壤碘平均含量均处于适宜水平,土壤碘含量远低于全国土壤碘背景值,整体属于低碘地区,无高碘区域。

2) 不同土壤类型间,土壤碘含量差异不大。表层土壤中,壤土、褐土、钙质石质土碘含量相对较高;中、深层土壤中,冲积土碘含量最高;上、中层土壤碘含量最低的是粗骨土;深层土壤碘含量最低的是黄绵土。

3) 不同地形坡度下,土壤碘含量随着地形坡度增大而降低,特别地,地形坡度超过 $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,碘含量下降率陡增;同一地形坡度下,随着土层深度增加,土壤碘含量呈下降趋势。

4) 不同土地利用类型下,表、中、深层土壤碘含量最高均为水浇地,表层最低的是旱地,中、深层最低的是草地。值得注意的是,草地中表层土壤碘含量是中层的2.8倍,是深层的8.5倍,呈现断崖式下降。

5) 韩城市表层土壤碘含量整体属于适量-边缘范围;中深层土壤在低-中山区与河流阶地区普遍属于碘缺乏,而在南部黄土台塬区与北部低山丘陵区整体上属于边缘范围。

### 参考文献:

- [1] Smoleń S, Kowalska I, Skoczylas Ł, et al. Effectiveness of enriching lettuce with iodine using 5-iodosalicylic and 3, 5-diiodosalicylic acids and the chemical composition of plants depending on the type of soil in a pot experiment[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132347.
- [2] Mohiuddin M, Hussain Z, Abbasi A, et al. Sawdust amendment in agricultural and pasture soils can reduce iodine losses[J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13620.
- [3] da Silva E C Jr, de Oliveira Wadt L H, da Silva K E, et al. Geochemistry of selenium, barium, and iodine in representative soils of the Brazilian Amazon rainforest[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154426.
- [4] 杨笑笑,曾道明,罗先熔,等.珠三角新会地区表层土壤硒、氟、碘地球化学特征研究[J].地球与环境,2020,48(2): 181-189.
- [5] 严爱兰.土壤碘的环境地球化学迁移研究[J].安徽农业科学,2014,42(16): 5056-5057.
- [6] 武少兴,龚子同,黄标.土壤中的碘与人类健康[J].土壤通报,1998(3): 44-47.
- [7] 曹寒,张月,金洁,等.土壤中碘的赋存形态及迁移转化研究进展[J].岩矿测试,2022,41(4): 521-530.
- [8] Pisarek P, Bueno M, Thiry Y, et al. Influence of tree species on selenium and iodine partitioning in an experimental forest ecosystem[J]. Science of the Total Environment, 2022, 809: 151174.
- [9] Roulier M, Carasco L, Orjollet D, et al. Iodine distribution and volatilization in contrasting forms of forest humus during a laboratory incubation experiment[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2022, 248: 106872.
- [10] 喜俊生,王玲,李新斌,等.陕西省韩城市凿开河流域土壤重金属来源分析与风险评价[J].环境生态学,2024,6(12): 1-8.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土地利用现状分类:GB/T 21010—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [12] 中华人民共和国国土资源部.多目标区域地球化学调查规范(1:250000):DZ/T 0258—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [13] 中国地质调查局.生态地球化学评价样品分析技术要求(试行):DD2005-03[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [14] 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.
- [15] 陈立乔,魏复盛.中国土壤中溴、碘的背景含量[J].干旱环境监测,1991,5(2): 65-69, 135.
- [16] Bowley H E, Young S D, Ander E L, et al. Iodine bioavailability in acidic soils of Northern Ireland[J]. Geoderma, 2019, 348: 97-106.
- [17] 张天祯,王虹.山东低碘地方性甲状腺肿与地质环境的关系[J].山东地质,1995(2): 68-75.
- [18] 朱发庆,谭见安.土壤碘的来源及其与我国地甲病分布规律的关系研究[J].地理科学,1989,9(4): 369-376, 98.
- [19] 齐雁冰,常庆瑞,黄洋,等.关中壤土发生特性与分类研究进展[J].土壤,2019,51(2): 211-216.
- [20] Fan Y K, Cheng P, Negri A, et al. Climate control of iodine isotopic composition evidenced by Argentine entisols records[J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(4): e2023GL107811.
- [21] 翁焕新,洪春来,严爱兰,等.碘的生物地球化学迁移及其定量模式[J].中国科学:地球科学,2013,43(9): 1481-1488.
- [22] Duborská E, Matulová M, Vaculovič T, et al. Iodine fractions in soil and their determination[J]. Forests, 2021, 12(11): 1512.
- [23] 王卫星,曹淑萍,张亚娜,等.天津东部地区水土环境碘地球化学特征及其成因分析[J].地球与环境,2020,48(3): 327-331.
- [24] 宋泽峰,蔡奎,冯星,等.冀中南平原土壤碘地球化学特征研究[J].中国地质,2014,41(6): 2144-2151.
- [25] 刘晓红,刘琼英,邝炎华,等.碘-125在华南亚热带地区土壤中淋溶和迁移的研究[J].核农学报,1998,12(3): 171-174.
- [26] 秦爱华,崔玉军,周亚龙,等.松辽盆地中部土壤碘的战略性油气勘查[J].现代地质,2015,29(1): 14-19.
- [27] 吴世汉,邢光熹.我国主要土壤类型中溴和碘的分布特性[J].土壤,1996,28(1): 21-23.