山西省屯留区富硒土地质量综合评价与利用

王大莹[1]，崔新宇[1]，曹培丽[1]，崔杰[1]，张仕裕[2]，樊文华[1]，冯志强[2]，何俊辰[3]，雷勇[1*]

1. 山西农业大学资源环境学院，山西 晋中 030801；
2. 太原理工大学矿业工程学院，太原 030024；
3. 山西省第三地质工程勘察院有限公司，太原 030620

第一作者，E-mail：121974305@qq.com

* 通信作者，E-mail：leiyong@sxau.edu.cn

2023-11-30 收稿；2024-04-11 修回；2024-04-12 接受

基金项目：山西省基础研究计划项目(20210302123378)；山西省优秀博士来晋工作奖励基金项目(SXYBKY2019032)；山西省地勘基金项目(0632-1911FW1L2054)。

中图分类号：S159　　文章编号：2096-8523(2025)05-0272-13　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230666

摘　要：开展土地调查与评价并发展特色产业是实现乡村振兴、巩固脱贫成果的重要工作。为了更加精准有效地指导区域农业生产布局和特色产业开发，在山西省长治市屯留区开展了富硒土地调查与评价工作。选取了富硒产业质量、生态环境和耕地地力 3 个方面的指标来构建富硒土地综合质量评价体系，运用模糊数学法、熵权法、综合指数法等方法评价与划分土地等级。结果表明：①屯留区硒含量等级为高和适量的土壤占比为 54.47%，集中分布于全区东部；耕地地力等级分布不均，整体为西低东高；全域生态环境状况清洁。②屯留区一等富硒土地面积为 299.33 km^2，占比为 26.21%，集中分布于东部平原地区。③屯留区小麦、尖椒和青椒达到富硒标准，尖椒富硒率为 100%，农作物清洁状况良好。④依据评价结果，结合屯留区国土空间规划，划分出 3 类土地：A 类地(富硒富肥且清洁)规划种植富硒小麦和绿色蔬菜，同时发展观光农业；B 类地(硒适量且清洁)规划种植富硒辣椒，同时发展农产品深加工；C 类地(非富硒富肥)打造农产品深加工体系，同时发展农贸和旅游。研究成果为屯留区富硒农业产业规划以及区域协同发展提供了理论支持及科学建议。

关键词：土地评价；富硒土壤；模糊数学法；熵权法；富硒农业；山西省屯留区

硒(Se)是对于植物生长和人体健康具有重要作用的微量元素[1]。当今全球几十个国家及区域严重缺硒，我国也有 72% 以上的缺硒或低硒地区，约 7 亿人口存在不同程度的硒摄入不足[2]。人体硒摄入主要依靠植物性食物，而植物硒的直接来源是土壤[3]。作为植物生长和繁育的基础，土壤环境深刻影响着农业发展和人类健康[4]。因此，基于土壤地球化学调查，开展富硒土地质量评价工作，依托富硒土地优势资源开发富硒农产品并发展富硒产业，不仅有利于满足人民大众对于健康生活的多元需求，也是促进乡村特色产业发展、实现乡村振兴的重要途径[5]。

目前，富硒土地资源的评价多以土壤硒含量、土壤肥力以及环境状况为指标进行等级划定，再结合农作物富硒及清洁状况进行区划应用[6-7]。以往研究对于土地利用、土壤质地等立地条件的考虑较少，且在分区利用时仅考虑农业种植，忽略了区域产业的整体布局。本研究依托于山西省自然资源厅 2019 年度地质勘查项目《山西省屯留县、长治县、平顺县 1∶5 万地球化学土地质量评估》的调查成果，以山西省长治市屯留区为研究区，构建了富硒产业质量、生态环境和耕地地力三位一体的富硒土地综合评价体系，划分出富硒土地质量等级。然后依托区域国土空间发展指引进行产业布局，为研究区开发利用富硒土地资源提出了合理建议。

著录信息：王大莹，崔新宇，曹培丽，等. 山西省屯留区富硒土地质量综合评价与利用 [J]. 地质科技通报，2025，44(5)：272-284.
WANG Daying, CUI Xinyu, CAO Peili, et al. Comprehensive evaluation and utilization of selenium-rich land quality in Tunliu District, Shanxi Province, China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 272-284.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

1 研究区概况

屯留区隶属于山西省长治市，地处山西省东南部，上党盆地西侧，紧邻长治市中心潞州区，是长治市“1+6”上党城镇群之一，区位优势明显(图 1)。研究区地理坐标为东经 112°28′～113°03′，北纬 36°13′～36°30′之间，总面积 1 142 km^2。区内地势西高东低，由西向东，山区、丘陵和平原各占约 1/3(图 1)。区域中部和东部平原被第四系黄土大面积覆盖，西部、西北部和西南部山区均出露三叠系，北部丘陵地带零星分布二叠系(图 2)。屯留区属暖温带半干旱半湿润气候区，大陆性气候显著，四季分明。耕地和居民聚居地主要分布于东部平原地区(图 3)，主要农作物有玉米、小麦、谷子、萝卜、辣椒、白菜等。

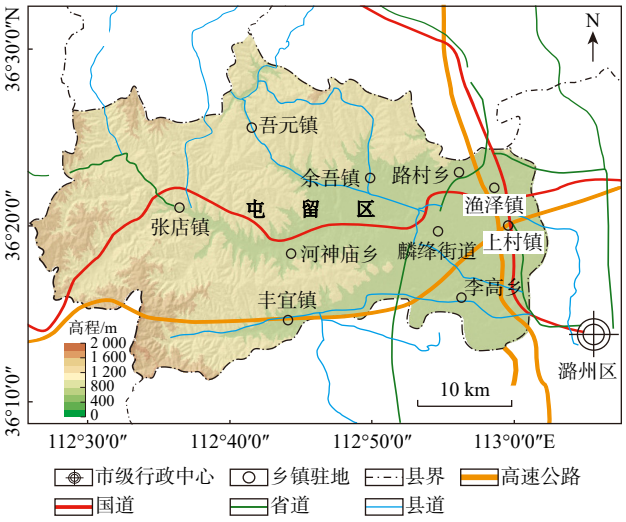


图 1 山西屯留区交通位置及高程图（底图修改自山西省 1∶200 万标准地图及长治市 1∶55 万地势图，来源于山西省自然资源厅网站）

Fig. 1 Transportation network and elevation of Tunliu District, Shanxi Province

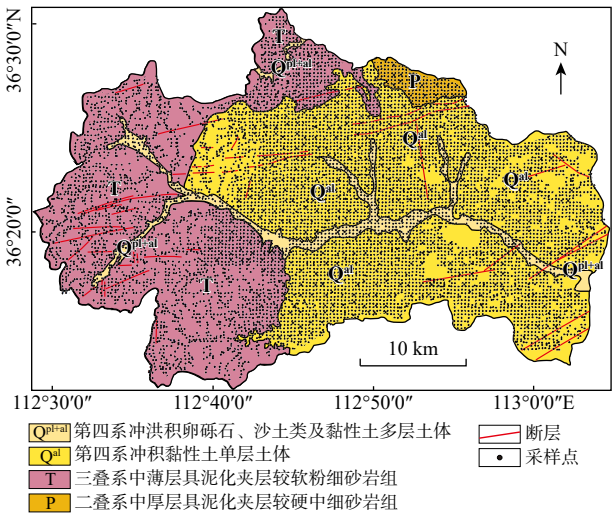


图 2 屯留区地质简图及土壤样点布置图（底图修改自文献 [8]）

Fig. 2 Geological sketch map and soil sample layouts in Tunliu District

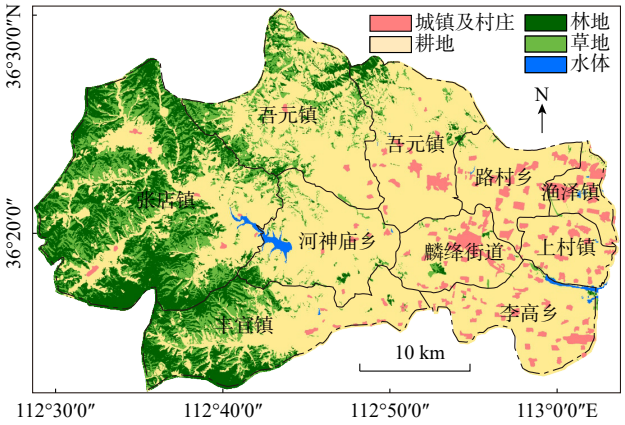


图 3 屯留区土地利用图（数据来源于 GlobeLand30 网站）

Fig. 3 Land use types in Tunliu District

2 研究方法

2.1 样品采集与分析测试

2.1.1 样品采集与处理

样品采集与分析测试按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 要求进行。土壤样品以网格法采集，采样深度为 0～20 cm，采样密度为 9 点/km^2。每个样品由 4～6 个子样混合组成，共计采集样品 9 332 件，样点布设如图 2。样点以 GPS 进行定位，采样时注意防止污染。采集后的样品经过晾干、粉碎、过孔径 1 500 nm(10 目)筛后，称取 1 000 g 样品用纸袋封装送实验室。

农作物及根系土样品于作物收获盛期采集。视采样地块不同情况采用棋盘法、梅花点法、对角线法等方法进行多点取样，然后组成一件 1 000 g 以上样品。样品采集后，玉米、小麦、谷子晒干脱粒，混匀铺平，用四分法缩分，取得约 500 g 样品送检。青椒、尖椒、白菜、萝卜、茴子白直接送检。根系土采集与处理方法同土壤样品。

灌溉水于农作物灌溉高峰期采集，采样密度为 1 件/16 km^2，共采集 66 件样品。大气干湿沉降物样品采样时间为 1 a，布设了 14 个采样点。采集与处理方法均满足《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 要求。

2.1.2 样品分析与测定

样品检测工作在山西省第三地质工程勘察院有限公司实验室完成。土壤样品 N、有机质采用冷

蒸气原子吸收光谱法(cold vapour-atomic absorption spectrometry, 简称 CVAAS)测定, Zn, Cd, Cr, Pb, Ni 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometer, 简称 ICP-MS)测定, Se, As, Hg 采用原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, 简称 AFS)测定, Cu、有效磷、速效钾采用电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma emission spectrometry, 简称 ICP-OES)法测定。样品分析中采用重复样监控分析测试的精密度。样品各分析指标合格率均满足《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 的要求。

2.2　评价方法

2.2.1　富硒土地综合质量评价体系构建

参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 和相关研究[10-12], 结合富硒土地资源开发利用的实际需求, 本研究构建了以富硒土地综合质量为目标层, 涵盖了富硒产业质量、生态环境、耕地地力 3 方面的富硒土地综合评价体系。为避免重复评价, 对各准则层下的初选指标进行筛选。土壤生态环境指标深刻反映土地健康, 因此从严处理, 全部纳入评价[11]。耕地地力各指标通过相关性分析筛选, 相关系数矩阵见表 1。各指标相关系数 R<0.7(显著性 p<0.01), 未呈现极强相关性, 因此全部纳入评价体系。参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 和《农业灌溉水质标准》(GB5084-2021)[13] 要求, 全区灌溉水、大气环境评价结果为全区一等, 因此未纳入评价体系。最终形成的屯留区富硒土地综合质量评价指标体系如表 2 所示。指标层等级由准则层计算综合指数后划分, 综合指数计算方法为公式(1), 权重由熵权法计算。

表 1　耕地地力指标相关系数矩阵

Table 1　Matrix of correlation coefficients of indicators of land productivity of arable land

指标	氮	有效磷	速效钾	有机质	pH	地形部位	土壤质地	利用现状
氮	1							
有效磷	0.301**	1						
速效钾	0.366**	0.445**	1					
有机质	0.591**	0.190**	0.253**	1				
pH	0.004	0.019	0.011	0.099**	1			
地形部位	0.127**	0.174**	0.119**	0.206**	0.298**	1		
土壤质地	0.140**	0.080**	0.001	0.158**	0.125**	0.312**	1	
利用现状	0.184**	0.134**	0.072**	0.298**	0.320**	0.568**	0.350**	1

注: **在0.01级别(双尾), 相关性显著

表 2　屯留区富硒土地综合质量评价体系及指标权重

Table 2　Evaluation system for comprehensive quality of selenium-rich land and weights of indicators in Tunliu District

目标层	准则层	指标层
富硒土地综合质量	富硒产业质量(0.395)	土壤硒
	生态环境(0.001)	土壤环境(As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn)
	耕地地力(0.604)	氮(0.10)
		有效磷(0.11)
		速效钾(0.01)
		有机质(0.22)
		pH(0.08)
		地形部位(0.07)
		土壤质地(0.02)
		利用现状(0.39)

注: 括号中数据代表权重

综合指数为权重乘以隶属度, 公式如下:

$$IFI=\sum_{j=1}^{m}(F_j\times Q_j), \tag{1}$$

式中: IFI 为综合指数; Q_j 为第 j 个指标的权重; F_j 为第 j 个指标的得分值; m 为指标个数。

本研究采用熵权法求取客观权重。先对指标进行标准化处理, 并对所有指标加上 0.000 001, 再通过公式计算权重。

正向指标标准化:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}}{\max\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}-\min\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}}+0.000\,001, \tag{2}$$

式中: x_{ij} 为指标的实测值; x'_{ij} 为标准化后的值; n 为样本个数。

负向指标标准化:

$$x'_{ij}=\frac{\max\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}-x_{ij}}{\max\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}-\min\{x_{1j},\cdots,x_{nj}\}}+0.000\,001。\quad(3)$$

第 j 项指标下，第 i 个样本的比重：

$$P_{ij}=\frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}x'_{ij}},i=1,\cdots,n,j=1,\cdots,m。\quad(4)$$

第 j 项指标的熵值：

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln(P_{ij}),i=1,\cdots,n,j=1,\cdots,m,\quad(5)$$

其中，k=1/ln$n$>0，满足 $e_j\geqslant 0$。

信息熵冗余度：$d_j=1-e_j,j=1,\cdots,m。\quad(6)$

各项指标权重：$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m}d_j},j=1,\cdots,m。\quad(7)$

2.2.2　富硒产业质量等级划分标准

富硒产业质量即土壤硒元素分级标准参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9]、《天然富硒土地划定与标识》(DZ/T0380-2021)[14] 制定，分为 5 个等级：缺乏(w(Se)≤0.125 mg/kg)、不足((0.125, 0.175]mg/kg)、适量((0.175, 0.30]mg/kg)、高((0.30, 3.0]mg/kg)、过剩(>3.0 mg/kg)。

2.2.3　生态环境等级划分标准与方法

土壤生态环境评价指标为 As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu 和 Zn。划分标准参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)[15]。划分方法参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)[9] 以及相关研究[16-17]，采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法计算，划分标准详见表 3。

表 3　土壤生态环境等级评价划分标准

Table 3　Criteria for classifying soil environmental grades

等级	一等	二等	三等	四等	五等
	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
单因子污染指数$P_{单}$	≤1	(1, 2]	(2, 3]	(3, 5]	>5
综合污染指数$P_{综}$	≤0.7	(0.7, 1]	(1, 2]	(2, 3]	>3

单因子污染指数计算公式为：

$$P_{单}=\frac{C}{S},\quad(8)$$

式中：$P_{单}$为土壤重金属元素的单因子污染指数；C 为土壤重金属元素的实测含量，mg/kg；S 为重金属元素的风险筛选值。

内梅罗综合污染指数计算公式为：

$$P_{综}=\sqrt{\frac{\left(\frac{1}{m}\sum_{1}^{m}P_{单}\right)^2+[\max(P_{单})]^2}{2}},\quad(9)$$

式中：$P_{综}$为土壤重金属元素的内梅罗综合污染指数。

2.2.4　耕地地力等级划分方法

耕地地力等级为氮、有效磷、速效钾、有机质、pH 以及地形部位、土壤质地和利用现状 8 个指标计算综合指数，再运用 ArcGIS 进行空间插值，以自然断点法划分等级得到。各评价指标量纲具有差异性，因此以模糊数学法计算隶属度。参考专家意见、第 3 次土壤普查分级标准及相关研究[18-20]，概念型指标隶属度直接确定(表 4)，数值型指标隶属度以公式计算(表 5)。

表 4　耕地地力概念型指标隶属度

Table 4　Affiliation of conceptual arable land productivity indicator

指标	隶属度				
地形部位	平原	盆地	低山丘陵	山地	
	1	0.8	0.6	0.4	
土壤质地	中壤土	轻壤土	重壤土	砂壤土、黏壤土、黏土	砂土
	1	0.85	0.8	0.6	0.4
利用现状	水浇地	旱地			
	1	0.7			

表 5　耕地地力数值型指标隶属度计算方法及函数转折点

Table 5　Calculation method and function turning points of numerical indicator affiliation of arable land productivity

指标	计算公式	函数转折点			
		x_1	x_2	x_3	x_4
氮	$f(x)=\begin{cases}1.0 & ,x\geqslant x_2\\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & ,x_1\leqslant x<x_2\\ 0.1 & ,x<x_1\end{cases}$	0.75	2		
有效磷		5	40		
速效钾		50	200		
有机质		10	40		
pH	$f(x)=\begin{cases}\frac{0.9(x_4-x)}{x_4-x_3}+0.1 & ,x_3\leqslant x\leqslant x_4\\ 1.0 & ,x_2\leqslant x<x_3\\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & ,x_1\leqslant x<x_2\\ 0.1 & ,x<x_1\end{cases}$	5.5	6.5	7.5	8.5

注：氮、有机质单位为g/kg；有效磷、速效钾单位为mg/kg；pH为无量纲；x为指标实测值；x_1、x_2、x_3、x_4分别为评价因子在函数曲线中转折点取值；下同

2.2.5　富硒土地综合质量等级划分方法

富硒土地综合质量等级由富硒产业质量、生态环境和耕地地力 3 个准则层指标计算综合指数，再运用 ArcGIS 进行空间插值，以自然断点法划分等级。

指标隶属度以隶属度函数计算(表 6),其中,耕地地力函数转折点为屯留区耕地地力五等综合指数的上限值(0.48)和一等综合指数的下限值(0.69)。

表 6　富硒土地综合质量评价指标隶属度计算方法及函数转折点

Table 6　Calculation method and function turning points of indicator affiliation of comprehensive quality evaluation index of selenium-rich land

准则层指标	计算公式	函数转折点	
		x_1	x_2
富硒产业质量 生态环境 耕地地力	$f(x)=\begin{cases}1.0, & x\geqslant x_2\\ \dfrac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1, & x_1\leqslant x<x_2\\ 0.1, & x<x_1\end{cases}$	0.125 0.7 0.48	0.3 1 0.69

2.2.6　农作物富硒及安全评价标准

农作物根系土富硒标准同土壤富硒标准,农作物富硒标准参考陕西省地方标准《富硒含硒食品与相关产品硒含量标准》(DB61/T556-2018)[21],农作物元素安全限值参考《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2017)[22]。

3　结果与分析

3.1　富硒土地综合质量评价结果

3.1.1　富硒产业质量评价结果

经计算可知,屯留区土壤 w(Se)范围为 0.03 ~ 1.65 mg/kg,平均值为 0.23 mg/kg,中位数为 0.20 mg/kg,方差为 0.013,标准差为 0.11,变异系数为 0.48。方差较小,表明土壤硒整体波动较小;变异系数较大,反映其可能存在局部偏离。经分析表明,屯留区土壤 w(Se)集中在 0.5 mg/kg 以下(图 4)。屯留区土壤 w(Se)平均值(0.23 mg/kg)略低于中国土壤 w(Se)平均值(0.26 mg/kg),与山西省平均值一致,高于中国黄土 w(Se)平均值(0.16 mg/kg)[23]。与其他地区土壤 w(Se)平均值相比,研究区硒含量水平与四川省雷波县(0.23 mg/kg)[24] 持平,略低于福建省闽侯县(0.27 mg/kg)[16]、四川省邻水县(0.28 mg/kg)[25],远低于陕西省紫阳县、汉阴县(0.83 mg/kg)[26] 以及湖北省恩施县(1.12 mg/kg)[27] 这类典型高硒地区。总体上,屯留区土壤硒含量平均值不高且分布不均,需加强科学规划才能高效利用。

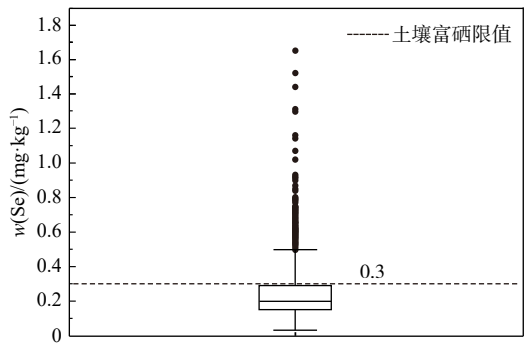
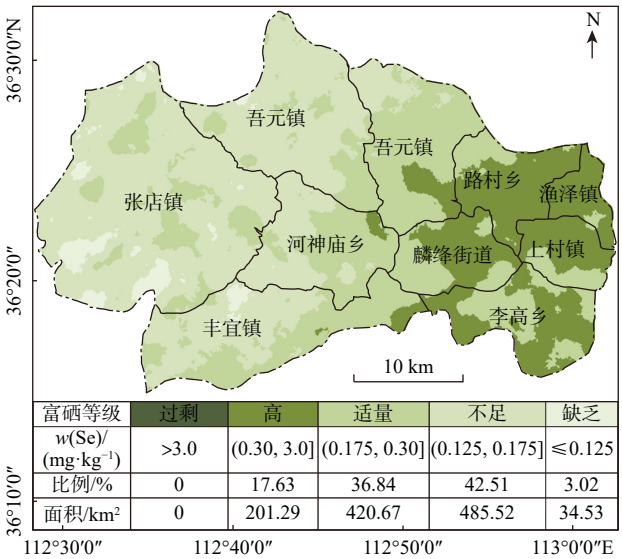


图 4　屯留区土壤硒含量箱线图

Fig. 4　Box plot of soil selenium content in Tunliu District

土壤硒含量等级评价结果显示,研究区土壤富硒等级总体上呈现出西低东高的特征(图 5)。全区高硒土地面积为 201.29 km^2,占比为 17.63%,土壤硒适量面积为 420.67 km^2,占比为 36.84%。土壤硒为不足和缺乏的面积分别为 485.52 和 34.53 km^2,占比分别为 42.51% 和 3.02%。高硒与硒适量土地占比总计达 54.47%,且分布与中东部大面积耕地重合度高,说明屯留区具备利用天然富硒土地资源、打造富硒农业种植基地的优势。



富硒等级	过剩	高	适量	不足	缺乏
w(Se)/(mg·kg^{-1})	>3.0	(0.30, 3.0]	(0.175, 0.30]	(0.125, 0.175]	≤0.125
比例/%	0	17.63	36.84	42.51	3.02
面积/km^2	0	201.29	420.67	485.52	34.53

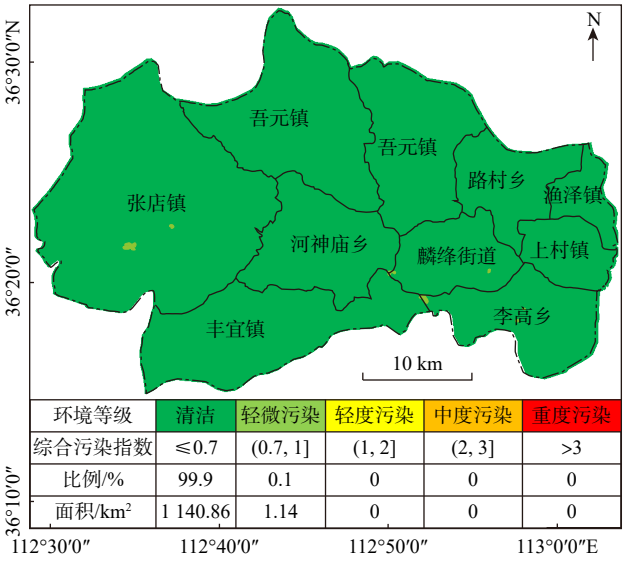
图 5　屯留区土壤硒含量等级分布图

Fig. 5　Distribution map of soil selenium levels in Tunliu District

3.1.2　生态环境评价结果

屯留区大气和灌溉水均为一等,因此全区生态环境等级等同于土壤环境综合等级。生态环境等级评价结果表明,屯留区环境清洁,一等地占比高达 99.9%。全区土壤环境单因子指数计算结果显示,仅极个别 As 和 Cd 存在轻微污染,因此全区土壤综合环境最差等级为轻微污染,面积占比 0.1%,仅零星出现在西部的张店镇和东部的麟绛街道、李高乡(图 6)。

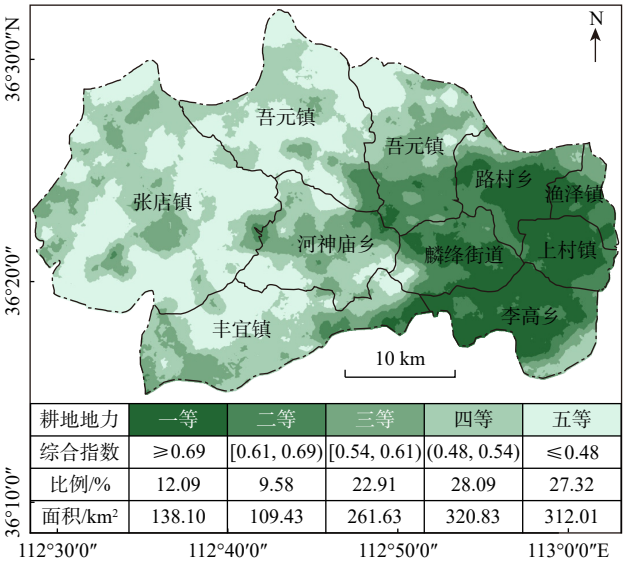
土壤健康状况影响农作物生长和繁育,重金属超标对人体也会造成损害[28-30]。重金属空间分布特



环境等级	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
综合污染指数	≤0.7	(0.7, 1]	(1, 2]	(2, 3]	>3
比例/%	99.9	0.1	0	0	0
面积/km²	1 140.86	1.14	0	0	0

图 6　屯留区土地生态环境等级分布图

Fig. 6　Distribution map of land ecological environment level in Tunliu District



耕地地力	一等	二等	三等	四等	五等
综合指数	≥0.69	[0.61, 0.69)	[0.54, 0.61)	(0.48, 0.54)	≤0.48
比例/%	12.09	9.58	22.91	28.09	27.32
面积/km²	138.10	109.43	261.63	320.83	312.01

图 7　屯留区耕地地力等级分布图

Fig. 7　Distribution map of arable land productivity class in Tunliu District

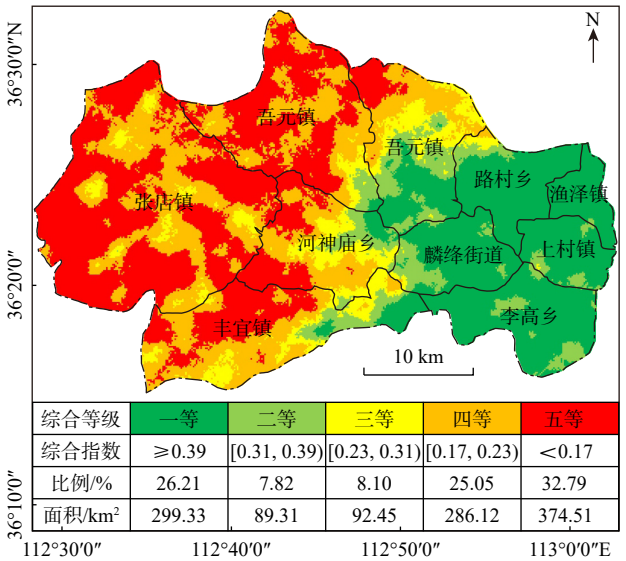
征影响因素复杂，包含地质背景、成土过程、土壤养分、人为活动等自然与人为两大类[31-32]。As 和 Cd 主要来源为化肥、农药，工业废弃物和化石燃料也会造成 As 污染[33]，因此推测研究区 As 和 Cd 超标为人类活动造成。屯留区土地生态环境质量总体清洁，适宜开发绿色农产品，发展特色农业产业。

3.1.3　耕地地力评价结果

全区耕地地力综合指数范围为 0.37 ~ 0.94，利用 ArcGIS 进行克里金空间插值，以自然断点法划分为 5 个等级(图 7)。其中，一等地面积为 138.10 km²，占比 12.09%，集中分布于全区东部；二等地面积为 109.43 km²，占比 9.58%，主要分布在一等地外缘；三等地面积为 261.63 km²，占比 22.91%，散布于全区各乡镇；四等地面积为 320.83 km²，占比 28.09%，中部和西部各乡镇均有较大面积分布；五等地面积为 312.01 km²，占比 27.32%，在西部乡镇有较大面积分布。屯留区耕地地力等级以三等及以下为主，一等耕地集中分布于全区东部，表明东部地区土地资源禀赋好，利于农业发展。全区耕地地力等级空间差异明显，东部较西部更高。一方面，西部以山地地形为主，耕种难度大；另一方面，东部耕地经长期的耕种、施肥而更富有养分，所以其耕地地力综合等级相对较高。

3.1.4　富硒土地综合质量评价结果

屯留区富硒土地综合指数范围为 0.099 ~ 0.998，利用 ArcGIS 进行空间插值，以自然断点法划分为 5 个等级(图 8)。其中，一等地面积 299.33 km²，占比 26.21%；二等地和三等地面积分别为 89.31，92.45 km²，占比分别为 7.82%，8.10%；四等地面积为 286.12 km²，占比 25.05%；五等地面积为 374.51 km²，占比为 32.79%。屯留区富硒土地综合质量等级分布呈现出明显的西低东高的特征，西部山地为大面积五等地，东部平原则连片分布一等地。由前文可知，富硒土地综合质量评价体系中，富硒产业质量权重为 0.395，耕地地力权重为 0.604，生态环境权重为 0.001，表明耕地地力是屯留区富硒土地综合质量的决定性因素、其次为富硒产业质量[34]。因此全区富硒土地综合质量与耕地地力等级分布特征高度相似，与富硒土地



综合等级	一等	二等	三等	四等	五等
综合指数	≥0.39	[0.31, 0.39)	[0.23, 0.31)	[0.17, 0.23)	<0.17
比例/%	26.21	7.82	8.10	25.05	32.79
面积/km²	299.33	89.31	92.45	286.12	374.51

图 8　屯留区富硒土地综合质量分布图

Fig. 8　Distribution map of integrated quality of selenium-rich land in Tunliu District

分布也有较好的一致性。

屯留区 85% 以上的一等富硒土地位于东部的路村乡、渔泽镇、上村镇、麟绛街道以及李高乡，其一等地面积占全区一等地面积百分比分别为 20.16%、9.88%、12.75%、16.73% 和 25.72%(表 7)。结合这几个乡镇耕地分布广、农业种植基础好的特点，可知屯留区东部适宜打造规模化的特色富硒农业种植基地。

3.2　农作物富硒及安全评价

3.2.1　农作物富硒评价

本研究统计了屯留区 8 种农作物及根系土共 240 件样品硒含量特征，结果如表 8 所示。全区农作物根系土富硒率差异较大，白菜=茴子白=青椒>萝卜>小麦>玉米>尖椒>谷子。不同农作物硒富集能力差异显著，富集系数由高到低为尖椒>小麦>谷子>青椒>玉米>茴子白>白菜>萝卜。尖椒和小麦硒富集系数分别为 0.21 和 0.16，明显优于其他农作物，富硒潜力优越。不同农作物硒含量水平差异较大，小麦硒含量最高，萝卜硒含量最低(图 9)。箱线图中虚线为粮食类作物富硒限值 0.05 mg/kg，点划线为蔬菜类作物富硒限值 0.02 mg/kg，达到富硒标准为小麦、青椒和尖椒，三者富硒率分别为 66.67%、93.33% 和 100%(表 8 和图 9)。统计发现，小麦根系土和作物富硒率均较高，茴子白、白菜和萝卜根系土富硒率较高，但作物不富硒；尖椒根系土富硒率相对不高，但作物富硒率高(表 8)，反映农作物硒含量水平与根系土之间的关系较复杂。土壤硒含量能反映土壤硒资源的生物有效性，因此农作物是否富硒在一定程度上受土

表 7　屯留区富硒土地综合质量评价结果

Table 7　Results of the comprehensive quality assessment of selenium-rich land in Tunliu District

区域	总面积/km²	等级	一等	二等	三等	四等	五等
张店镇	319.69	比例/%	0	0.02	15.28	37.03	53.30
		面积/km²	0	0.02	14.14	105.98	199.65
吾元镇	160.39	比例/%	0.40	6.28	6.93	21.49	22.84
		面积/km²	1.21	5.61	6.41	61.49	85.57
余吾镇	119.84	比例/%	9.27	29.59	25.45	10.06	3.52
		面积/km²	27.74	26.44	23.55	28.80	13.17
路村乡	69.90	比例/%	20.16	6.32	3.31	0.32	0
		面积/km²	60.34	5.65	3.06	0.91	0
渔泽镇	30.02	比例/%	9.88	0.32	0	0	0
		面积/km²	29.57	0.28	0	0	0
河神庙乡	101.26	比例/%	1.51	12.88	23.94	11.57	8.02
		面积/km²	4.52	11.51	22.15	33.13	30.05
上村镇	43.57	比例/%	12.75	5.88	0.14	0	0
		面积/km²	38.17	5.25	0.13	0	0
麟绛街道	64.29	比例/%	16.73	14.30	1.27	0.07	0
		面积/km²	50.08	12.77	1.17	0.19	0
丰宜镇	146.38	比例/%	3.57	13.35	23.62	19.44	12.30
		面积/km²	10.70	11.92	21.85	55.63	46.07
李高乡	86.64	比例/%	25.72	11.02	0	0	0
		面积/km²	77.01	9.85	0	0	0

表 8　屯留区农作物及根系土硒元素特征统计

Table 8　Statistical of selenium characteristics of crops and root soils in Tunliu District

样品	种类	样本数	最小值	最大值	平均值	标准离差	变异系数	富集系数	富硒标准	富硒件数	富硒率/%
			w(Se)/(mg·kg^{-1})						w(Se)/(mg·kg^{-1})		
根系土	小麦	30	0.242	0.529	0.390	0.070	0.18	/	>0.3	27	90.00
	玉米	105	0.119	0.912	0.336	0.145	0.43	/		55	52.38
	谷子	30	0.194	0.411	0.254	0.061	0.24	/		3	16.67
	萝卜	15	0.290	0.407	0.357	0.031	0.09	/		14	93.33
	白菜	15	0.315	0.359	0.343	0.012	0.04	/		15	100
	茴子白	15	0.301	0.376	0.345	0.017	0.05	/		15	100
	尖椒	15	0.099	0.461	0.269	0.093	0.35	/		7	46.67
	青椒	15	0.301	0.423	0.377	0.031	0.08	/		15	100
农作物	小麦	30	0.026	0.138	0.062	0.025	0.40	0.16	≥0.05	20	66.67
	玉米	105	0.015	0.042	0.020	0.006	0.30	0.06		0	0
	谷子	30	0.020	0.028	0.023	0.002	0.08	0.09		0	0
	萝卜	15	0.001	0.003	0.002	0.000	0.18	0.01	≥0.02	0	0
	白菜	15	0.004	0.016	0.007	0.003	0.43	0.02		0	0
	茴子白	15	0.006	0.016	0.009	0.003	0.30	0.03		0	0
	尖椒	15	0.032	0.084	0.057	0.015	0.26	0.21		15	100
	青椒	15	0.018	0.042	0.031	0.007	0.22	0.08		14	93.33

注：农作物富集系数为农作物元素质量分数平均值/根系土元素质量分数平均值；下同

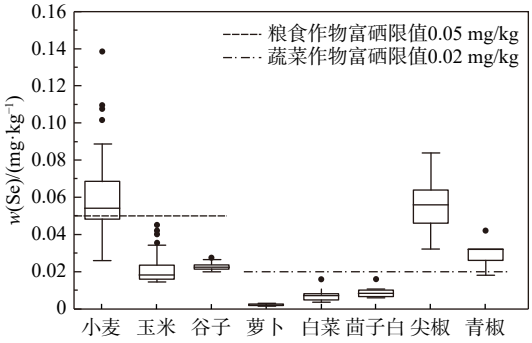


图 9　屯留区农作物硒含量箱线图

Fig. 9　Box line diagram of selenium content of crops in Tunliu District

壤硒含量影响[35]。但土壤有效态硒含量的丰富度、植物自身特性等也是重要影响因素[36-37]，因此种植于富硒土壤上的作物不一定富硒。

3.2.2　农作物安全评价

统计发现，屯留区所有农作物根系土均无重金属超标。8 种农作物中，仅萝卜、青椒和尖椒出现个别重金属元素超过安全限值(表 9)。萝卜有 2 件样品检测出 Pb 超标，超标率为 13.33%，富集系数为 0.003。尖椒和青椒存在 Cd, Cr 和 Pb 超过安全限值的情况。从富集系数看，尖椒和青椒的 Cd 富集系数偏高，表明二者对于土壤中的 Cd 有较强的吸收能力，需关注土壤清洁。萝卜的 Pb、尖椒和青椒的 Cr 和 Pb 的富集系数很低，表明植物本身对土壤中 Cr 和 Pb 的吸收能力很弱。由前文可知，屯留全区土壤、大气和灌溉水清洁程度好，因此推测本次作物出现重金属元素超标与作物强富集特性和农药、化肥的不合理使用有关[38]。

4　讨　论

4.1　富硒土地质量评价

硒已被证明为重要的健康元素，自然界中的硒分布不均，众多居民面临缺硒风险，使得开展富硒土地调查与评价工作具有重要意义[39-41]。当前的富硒土地质量评价工作按照评价方法的不同可分为两大类：一是依据相关标准分别对土壤(富硒程度、清洁状况以及养分丰缺)、大气、灌溉水、农作物进行评价，再将各要素评价结果进行空间叠图；二是选取相关评价指标构建评价体系，利用层次分析、模糊数学等方法进行综合评价，依据综合得分划分等级，再利用地理信息系统展示结果[42]。富硒土地评价工作中常用的参考标准包括富硒土壤、农田土壤环境质量、绿色食品产地环境质量、富硒农产品及食品卫生、土壤养分分级、农田灌溉水质量等方面的标准[43]。其中，《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295-2016)[9] 因其涵盖内容全面、方法相对简单，为最常用的参考标准[7, 26]。依据现有标准进行富硒土地评价总体上能划分出清洁富硒的土地，具有方便快捷的特点，但缺乏对土地管理、土地生产条件的综合考虑，在一定程度上有失全面[11]。

构建富硒土地综合评价体系常选取生态环境、耕地地力以及富硒产业质量三方面的指标。生态环境即土壤、大气、灌溉水重金属污染状况；耕地地力包含地形部位、地面坡度等立地条件，土壤 pH、土壤质地等土壤理化性质，土壤氮磷钾等养分状况，土地利用现状、灌溉保障能力等土地管理情况；富硒产业质量则是土壤硒含量水平。筛选评价指标时，要求考虑系统、实用、独立等原则，以保证评价工作简洁且有效[11]。本研究以屯留区 1∶5 万土壤地球化学调查成果[8] 为基础，参考前人研究[6-7, 10-12]，选取富硒产业质量、生态环境、耕地地力三方面的指标构建了富硒土地质量综合评价体系，运用模糊数学法和熵权法计算综合指数，再运用地理信息系统进行综合分析，从而得到相对客观的富硒土地质量综合评价结果。相比于依据相关标准[9]，以土壤元素含量丰缺划分等级，本次评价工作更周全地考虑了对农

表 9　屯留区作物重金属超标情况

Table 9　Exceedance of heavy metals in crops in Tunliu District

指标	样品	样本数	最小值	最大值	平均值	标准离差	变异系数	富集系数	安全限值	超标数	超标率/%
			w_B/(mg·kg^{-1})						w_B/(mg·kg^{-1})		
Cd	尖椒	15	0.042	0.086	0.059	0.012	0.209	0.412	0.05	12	80.00
	青椒	15	0.026	0.074	0.045	0.015	0.322	0.254		4	26.67
Cr	尖椒	15	0.516	1.050	0.670	0.143	0.213	0.010	0.5	15	100
	青椒	15	0.322	0.588	0.445	0.077	0.174	0.007		2	13.33
Pb	萝卜	15	0.040	0.111	0.078	0.023	0.299	0.003	0.1	2	13.33
	尖椒	15	0.182	0.472	0.252	0.078	0.308	0.010		15	100
	青椒	15	0.146	0.272	0.203	0.037	0.183	0.008		15	100

业产生影响的因素，且熵权法计算权重能紧密结合研究区资源特征，使评价结果更为精准客观和全面，有利于区域产业科学布局[43-44]。

4.2　富硒土地开发利用

富硒土地开发利用通常根据土地评价结果结合农作物质量状况进行农业布局。首先根据土地硒含量高低、养分丰缺以及清洁程度划分土地类型，再根据各类型土地特征提出相应的农业布局建议或农艺改良措施。富硒且清洁高产土地多作为特色富硒农作物种植区；不富硒但养分和清洁状况良好的土地通常作为普通农业种植区；有污染风险土地则提出管控和改良建议或规划为其他用地。在此基础上，也有研究者根据区域农作物评价结果，进一步圈定特色农产品基地，为发展特色富硒农业提供更精准的土地利用建议[45-46]。

土地资源的区划应用仅着眼于农业布局已无法满足资源高度整合、城乡不断融合发展的时代背景[5, 47]。依据土地评价结果，结合区域天然资源以及产业发展特征，构建一、二、三产业有机结合的功能布局，打造农业与加工业以及特色旅游业多方位发展的新型小镇、特色乡村，才是实现乡村振兴、推动全域繁荣的有效途径。因此，本研究以《屯留县国土空间总体规划(2021−2035 年)》[48] 为框架，结合土地与农作物评价结果，将屯留区土地划分为 A、B、C 3 类地。同时圈定特色农产品种植基地，以乡镇行政区为单位，提出发展休闲观光农业、构建农产品深加工体系以及开发农贸、旅游的发展指引，以期精准落实富硒土地质量综合评价成果，发展特色富硒产业，推动全域协调发展(图 10)。

A 类地为一等富硒土地，主要分布于全区东部。其特点是土壤硒含量水平高、耕地地力条件好且土地环境清洁，具有发展绿色富硒农业的天然资源优势，建议打造特色农产品种植基地并发展休闲观光农业。路村乡、渔泽镇、麟绛街道和上村镇一带，一等富硒土地分布集中、连片程度好。结合屯留区小麦富硒率较高且绿色无污染的评价结果，建议在此区域规划富硒小麦种植基地。依托天然富硒土地资源，开发具有“生态、高品质、富硒”内涵的小麦产品，提升农产品附加值和竞争力、带动农民增收，同时保障我国粮食安全[49]。李高乡具有良好的区位、交通条件和农业基础，可依托此优势建设绿色蔬菜种植基地，强化城郊农业发展。根据前文分析可知，屯留区白菜和茴子白不存在重金属超标情况，适宜作为绿色蔬菜产品进行推广种植。A 类地各乡镇建设特色农产品种植基地的同时，可依托自身特点，发挥区位、资源优势，开发特色农业休闲观光项目，发展乡村旅游。例如，利用麦田风光打造田园综合体，开发富硒健康美食、建设休闲康养农庄等。依托特色富硒产业建设乡村研学旅游基地，为富硒资源开发利用以及产业建设提供研学平台。

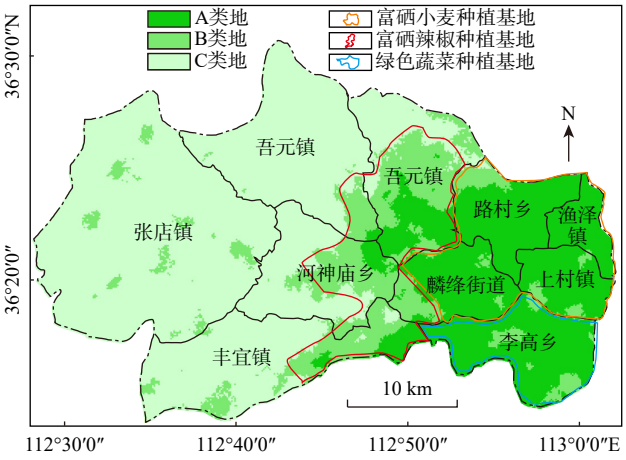


图 10　屯留区富硒土地利用区划

Fig. 10　Selenium-rich land use zoning in Tunliu District

B 类地为二、三等富硒土地，主要分布于全区中部。其特点是土壤硒含量水平适量、耕地地力条件较好且土地环境清洁，适宜种植富硒能力强的农作物。因此建议该区域打造特色农产品种植基地并发展加工业以延伸产业链。由前文可知，辣椒富硒能力相对较强，对土壤硒含量要求相对较低。结合屯留区现有种植基础，圈定以余吾镇、河神庙乡为主、同时涵盖丰宜镇、麟绛街道的 B 类地集中分布区为富硒辣椒种植基地建设区。种植辣椒的同时，依托“麟绛红”品牌，发展农产品深加工体系，开发富硒辣椒酱、辣椒调料等深加工产品，增加产品附加值，同时提供就业机会，为居民增收。值得注意的是，本次研究发现辣椒存在重金属超标风险，建议进一步筛选安全的品种，并采取以有机肥代替化肥、减少农药施用或采用生物防治等方法培育绿色富硒辣椒[50]。

C 类地为四、五等富硒土地，主要分布于全区西部。其特点是土壤硒含量水平相对低、耕地地力差，不适宜发展大规模农业种植。现代农业从作物种植到农产品及其深加工产品，生产、销售和消费之间的联系日益密切，上下游之间的衔接也更为紧密，形成了具有地域协同性的产业链。屯留区国土空间规划明确指出要依托城市发展主轴，延伸农业产业链，推动农产品深加工。因此建议屯留区西部以 C 类地为主的乡镇，依托东部特色富硒农产品，构建深加工体

系，开发富硒面粉、麦片、辣椒酱等深加工产品，延长产业链。同时依托该片区山水风光特征，整合生态、农业资源，发展旅游业，建设以农贸为主导、以旅游为特色的新型小镇。

5 结 论

（1）屯留区富硒产业质量等级以适量和不足为主，高硒土地占比为 17.63%，面积为 201.29 km^2，集中分布于东部乡镇。全区环境清洁，99.99% 为一等清洁土地。全区耕地质量西低东高，一等耕地地力区域与东部平原空间耦合高。受富硒产业质量和耕地地力等级影响，全区富硒土地综合质量等级为西低东高的特征，一等地面积 299.33 km^2，集中分布于东部平原。

（2）研究区不同农作物硒含量水平差异较大，小麦>尖椒>青椒>谷子>玉米>茴子白>白菜>萝卜。达到富硒标准有小麦、青椒和尖椒，富硒率分别为 66.67%，93.33% 和 100%。作物硒含量与土壤硒总量有一定联系，但土壤硒有效态以及植物特性等因素也可能对作物硒含量水平产生重要影响，需进一步研究分析。

（3）根据评价结果，划分出 3 类地：A 类地富硒富肥且清洁，规划建设富硒小麦和绿色蔬菜种植基地，同时发展休闲观光农业；B 类地清洁但富硒和耕地地力等级稍次，规划种植硒富集能力强的辣椒，打造富硒辣椒种植基地，同时构建农产品深加工体系；C 类地硒含量不高且耕地地力等级低，建议规划为产业延伸区，构建产品深加工体系并发展农贸和乡村旅游。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] XU Z N, LIN Z Q, ZHAO G S, et al. Biogeochemical behavior of selenium in soil-air-water environment and its effects on human health[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21(1): 1159-1180.

[2] EKUMAH J N, MA Y K, AKPABLI-TSIGBE N D K, et al. Global soil distribution, dietary access routes, bioconversion mechanisms and the human health significance of selenium: A review[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100960.

[3] CHEN N, ZHAO C H, ZHANG T H. Selenium transformation and selenium-rich foods[J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100875.

[4] BOUMA J. Soil security in sustainable development[J]. Soil Systems, 2019, 3(1): 5.

[5] 王新峰, 龚磊, 刘元晴, 等. 水土质量调查评价与人群健康关系的融合路径研究 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 305-314.
WANG X F, GONG L, LIU Y Q, et al. Integration path research of water and soil quality investigation and evaluation and human health relationship[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 305-314. (in Chinese with English abstract)

[6] YU T, HOU W L, HOU Q Y, et al. Safe utilization and zoning on natural selenium-rich land resources: A case study of the typical area in Enshi County, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(9): 2803-2818.

[7] 汤奇峰, 徐春丽, 刘斯文, 等. 江西赣州市瑞金盆地天然富硒土地资源特征与保护利用 [J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1932-1943.
TANG Q F, XU C L, LIU S W, et al. Characteristics and protection and utilization of natural selenium-rich land resources in Ruijin Basin, Ganzhou, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1932-1943. (in Chinese with English abstract)

[8] 张亚丽, 张志敏, 张继军, 等. 山西省屯留县 1∶5 万地球化学土地质量评估成果报告 [R]. 山西晋中: 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 2023.
ZHANG Y L, ZHANG Z M, ZHANG J J, et al. Earth chemical land quality assessment results report of 1∶50000 in Tunliu County, Shanxi Province[R]. Jinzhong Shanxi: Shanxi Third Geological Engineering Survey Co., Ltd., 2023. (in Chinese)

[9] 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/T0295-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification for geochemical evaluation of land quality: DZ/T 0295-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)

[10] LIU Y L, LIU S L, ZHAO W, et al. Assessment of heavy metals should be performed before the development of the selenium-rich soil: A case study in China[J]. Environmental Research, 2022, 210: 112990.

[11] 徐雪生, 骆检兰, 黄逢秋, 等. 富硒耕地质量评价体系构建及其在湖南省新田县新圩镇的应用 [J]. 中国地质, 2022, 49(3): 789-801.
XU X S, LUO J L, HUANG F Q, et al. Construction of the evaluation system for Se-rich arable land and its application in Xinxu Town, Xintian County, Hunan Province[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 789-801. (in Chinese with English abstract)

[12] 杨晓帆, 蔡海生, 张学玲, 等. 富硒耕地质量综合评价及利用分区研究: 以宜春市袁州区为例 [J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 482-493.
YANG X F, CAI H S, ZHANG X L, et al. Study on comprehensive evaluation and zoning of selenium-enriched arable land quality: A case study of Yuanzhou District, Yichun[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(2): 482-493. (in Chinese with English abstract)

[13] 中华人民共和国生态环境部. 农业灌溉水质标准: GB5084-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Agricultural irrigation water quality standards: GB5084-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[14] 中华人民共和国自然资源部. 天然富硒土地划定与标识: DZ/T 0380-2021[S]. 北京: 中国地质调查局, 2021.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Delimitation and the logo for natural selenium-enriched land: DZ/T0380-2021[S]. Beijing: China Geological Survey, 2021.(in Chinese)

[15] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国市场监督管理局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行): GB15618-2018[S]. 北京: 中国环境出版社 , 2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB15618-2018[S]. Beijing: China Environment Press, 2018. (in Chinese)

[16] 邹山进洪. 闽侯县表层土壤及农产品硒含量特征 [J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 247-256.
ZOU S J H. Selenium contents in surface soil and agricultural products in Minhou County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 247-256. (in Chinese with English abstract)

[17] FU Z B, HE N J, MA M, et al. Source apportionment and probabilistic risk assessment of heavy metals in selenium-rich soils in Hainan Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2023, 251: 107241.

[18] ZHAO R, WU K N, LI X L, et al. Discussion on the unified survey and evaluation of cultivated land quality at county scale for China's 3rd national land survey: A case study of Wen County, Henan Province[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2513.

[19] 赵洪宝, 蒋冬梅, 李岳, 等. 河曲露天矿排土场不同复垦区土壤质量评价 [J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 419-427.
ZHAO H B, JIANG D M, LI Y, et al. Evaluation of soil quality in different reclamation areas of Hequ open-pit mine dump[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 419-427. (in Chinese with English abstract)

[20] 庞馨月. 巴彦淖尔市耕地地力评价 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
PANG X Y. Evaluation of cultivated land fertility in Bayannur City[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[21] 陕西省市场监督管理局, 陕西省质量技术监督局. 富硒含硒食品与相关产品硒含量标准: DB61/T556-2018[S]. 西安: 陕西省地方标准出版社, 2018.
Shaanxi Provincial Administration for Market Regulation, Shaanxi Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Selenium-rich selenium-containing foods and related products selenium content standards: DB61/T556-2018[S]. Xi'an: Shanxi Local Stanclard Publishing House, 2018. (in Chinese)

[22] 中华人民共和国市场监督管理总局, 中华人民共和国卫生健康委员会. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB2762-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Health Commission of the People's Republic of China. National food safety standard limits for contaminants in food: GB2762-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[23] TAN J A, ZHU W Y, WANG W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China[J]. Science of the Total Environment, 2002, 284(1/3): 227-235.

[24] 时章亮, 金立新, 廖超, 等. 四川雷波县重点耕地区土壤硒含量特征及其成因分析 [J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1253-1260.
SHI Z L, JIN L X, LIAO C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1253-1260. (in Chinese with English abstract)

[25] 武芝亮, 李致坤, 侯青叶, 等. 四川省邻水县土壤及作物硒地球化学特征及其研究意义 [J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1752-1761.
WU Z L, LI Z K, HOU Q Y, et al. Geochemical characteristics of selenium in soils and crops and its research significance in Linshui County, Sichuan Province[J]. Geoscience, 2021, 35(6): 1752-1761. (in Chinese with English abstract)

[26] 侯拓. 安康西部县域土壤–作物体系中硒镉影响因素及土地安全区划研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
HOU T. Study on selenium and cadmium influencing factors and soil safety in the soil-crop system in the western county of Ankang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese with English abstract)

[27] LI M L, YANG B Y, XU K Y, et al. Distribution of Se in the rocks, soil, water and crops in Enshi County, China[J]. Applied Geochemistry, 2020, 122: 104707.

[28] 陈继平, 钞中东, 任蕊, 等. 陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量相关性及安全性评价 [J]. 西北地质, 2021, 54(2): 273-281.
CHEN J P, CHAO Z D, REN R, et al. Correlation and safety evaluation of crop heavy metal content in Shaanxi Guanzhong selenium-enriched areas[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 273-281. (in Chinese with English abstract)

[29] MA L, ABUDUWAILI J, LIU W. Spatial distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in surface soils of Bosten Lake Basin, central Asia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(19): 3741.

[30] KHORSHIDI N, PARSA M, LENTZ D R, et al. Identification of heavy metal pollution sources and its associated risk assessment in an industrial town using the K-means clustering technique[J]. Applied Geochemistry, 2021, 135: 105113.

[31] 覃星铭, 马国斌, 蒋忠诚, 等. 典型石漠化峰丛洼地土壤重金属的空间分异特征及其影响因素 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 283-292.
QIN X M, MA G B, JIANG Z C, et al. Spatial variations and influencing factors analysis of heavy metals in the soil of typical rocky desertification peak cluster depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 283-292. (in Chinese with English abstract)

[32] XIANG M T, LI Y, YANG J Y, et al. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116911.

[33] WANG X J, LI W B, WANG D Y, et al. Trinity assessment method applied to heavy-metal contamination in peri-urban soil-crop

systems: A case study in Northeast China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108329.

[34] 邓远文, 江林香. 基于熵权-层次分析法的土壤质量综合评价: 以甘洛县松树坪村为例 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(4): 33-35.
DENG Y W, JIANG L X. Comprehensive evaluation of soil quality based on entropy weight-analytic hierarchy process: Taking Songshuping Village in Ganluo County as an example[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(4): 33-35. (in Chinese with English abstract)

[35] KUSHWAHA A, GOSWAMI L, LEE J, et al. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2022, 52(13): 2383-2420.

[36] ULLAH H, LIU G J, YOUSAF B, et al. A comprehensive review on environmental transformation of selenium: Recent advances and research perspectives[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(2): 1003-1035.

[37] 张亚丽, 张志敏, 张继军, 等. 安康西部农田土壤硒形态及农作物富硒特征 [J]. 西北地质, 2021, 54(3): 229-235.
ZHANG Y L, ZHANG Z M, ZHANG J J, et al. Soil selenium speciation in cropland of western Ankang and the characteristics of crop selenium enrichment[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 229-235. (in Chinese with English abstract)

[38] LI D X, LIU G N, LI X S, et al. Heavy metal(loid)s pollution of agricultural soils and health risk assessment of consuming soybean and wheat in a typical non-ferrous metal mine area in Northeast China[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2953.

[39] TITOV A F, KAZNINA N M, KARAPETYAN T A, et al. Role of selenium in plants, animals, and humans[J]. Biology Bulletin Reviews, 2022, 12(2): 189-200.

[40] KAZI TANI L S, DENNOUNI-MEDJATI N, TOUBHANS B, et al. Selenium deficiency: From soil to thyroid cancer[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5368.

[41] KUMAR A, PRASAD K S. Role of nano-selenium in health and environment[J]. Journal of Biotechnology, 2021, 325: 152-163.

[42] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法 [J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 319-336.
ZHOU G H. Research progress of selenium-enriched land resources and evaluation methods[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 319-336. (in Chinese with English abstract)

[43] 张俊, 戴亮亮, 巩浩, 等. 基于预测农作物 Se 含量构建富硒土地质量评价体系: 以湖南龙山县为例 [J]. 中国地质, 2025, 52(1): 362-371.
ZHANG J, DAI L L, GONG H, et al. Construction of Se-enriched land quality evaluation system based on predicted Se content in crops: A case study of Longshan County, Hunan Province[J]. Geology in China, 2025, 52(1): 362-371. (in Chinese with English abstract)

[44] 曾庆良. 湖北省恩施市沙地乡富硒土地安全利用区划研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
ZENG Q L. Study on the safe utilization of selenium-rich land resources in Shadi Town, Enshi City, Hubei Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)

[45] XIE S Y, WAN X, DONG J B, et al. Quantitative prediction of potential areas likely to yield Se-rich and Cd-low rice using fuzzy weights-of-evidence method[J]. Science of the Total Environment, 2023, 889: 164015.

[46] LIANG R Y, SONG S, SHI Y J, et al. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soils based on the analytic hierarchy process: Assessment system construction and case demonstration[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605: 618-625.

[47] TOOR G S, YANG Y Y, DAS S, et al. Soil health in agricultural ecosystems: Current status and future perspectives[J]. Advances in Agronomy, 2021, 168: 157-201.

[48] 屯留区人民政府. 屯留县国土空间总体规划 (2021-2035 年) [R]. 山西长治: 屯留区人民政府, 2023.
The People's Government of Tunliu District. Tunliu County land and space master plan (2021-2035) [R]. Changzhi Shanxi: The People's Government of Tunliu District, 2023. (in Chinese)

[49] 黎莉莉, 胡晓群, 陈松柏. 新世纪中国粮食生产特征及粮食安全政策取向 [J]. 宏观经济研究, 2023(1): 70-83.
LI L L, HU X Q, CHEN S B. Characteristics of China's grain production and grain security policy orientation in the new century[J]. Macroeconomics, 2023(1): 70-83. (in Chinese with English abstract)

[50] 万继磊, 李密, 徐立甫. 辣椒地土壤重金属含量与植株重金属富集的相关性研究 [J]. 耕作与栽培, 2022, 42(6): 91-93.
WAN J L, LI M, XU L F. Study on the correlation between heavy metal content in pepper field soil and plant metal enrichment[J]. Tillage and Cultivation, 2022, 42(6): 91-93. (in Chinese with English abstract)

Summary for “山西省屯留区富硒土地质量综合评价与利用”

Comprehensive evaluation and utilization of selenium-rich land quality in Tunliu District, Shanxi Province, China

WANG Daying[1]，CUI Xinyu[1]，CAO Peili[1]，CUI Jie[1]，ZHANG Shiyu[2]，FAN Wenhua[1]，FENG Zhiqiang[2]，HE Junchen[3]，LEI Yong[1*]

1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801, China；
2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China；
3. The Third Geological Engineering Survey Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030620, China

First author，E-mail：121974305@qq.com

* Corresponding author， E-mail：leiyong@sxau.edu.cn

Abstract：[**Objective**] Land resource assessment and specialty industry cultivation are pivotal for China's rural revitalization and poverty alleviation initiaives. To optimize regional agricultural planning and specialty sector development, this study implemented a selenium-rich land resource survey in Tunliu District, Changzhi City, Shanxi Province. [**Methods**] A comprehensive land quality evaluation framework was established, integrating three dimensions: Selenium-rich industrial potential, ecological integrity, and arable land productivity. The fuzzy mathematical method, entropy weighting, and composite index modeling were synergistically applied for land classification, with spatial patterns visualized through ArcGIS. [**Results**] The results show that: ①54.47% of the study area contains medium-to-high selenium concentrations, predominantly clustered in eastern regions. Arable land productivity demonstrates spatial heterogeneity, with lower values in western zones versus higher eastern values. ②299.33 km^2 (26.21% of total) of first-class quality land was identified in eastern plains. ③Wheat, chili peppers, and bell peppers exhibit 100% selenium enrichment compliance with crops in good condition. ④Based on land and crop evaluation results, and considering spatial planning, the land is classified into three types: A, B, and C. Zone A (Premium): Supports selenium-rich wheat/vegetable cultivation and agro-tourism (eastern plains). Zone B (Transitional): Suitable for diversified cropping with selenium supplementation. Zone C (Marginal): Recommended for agricultural product processing and trade hubs due to suboptimal selenium (<0.30 mg/kg) and nutrient levels. [**Conclusion**] This study provides theoretical support and scientific recommendations for planning the selenium-rich agricultural industry in Tunliu District and for its integrated regional development.

Key words: land evaluation； selenium-rich soil； fuzzy mathematical method； entropy weighting method； selenium-rich agriculture； Tunliu District, Shanxi Province

Received：2023-11-30；Revised：2024-04-11；Accepted：2024-04-12

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230666