



河北井陘地区耕地表层土壤质量地球化学评价

郜宁¹, 芦岩¹, 康宁², 梅学嘉¹, 边文英¹, 周路征¹

1. 河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心(河北省矿山和地质灾害应急救援中心), 河北 石家庄 050081;

2. 河北地矿建设工程集团有限责任公司, 河北 石家庄 050081

摘要: 土壤质量地球化学评价是农业种植等合理利用土地资源的重要参考依据。井陘地区作为石家庄市生态涵养区, 农业是其主要的第一产业。以井陘地区作为研究区, 采集表层土壤样品 158 件, 对土壤地球化学特征、养分元素丰缺性、环境地球质量和综合等级进行分析评价。结果显示, 土壤质量综合等级以一等和二等为主, 表明研究区土壤环境地球化学等级为清洁, 土壤养分地区化学等级为较丰富, 为合理利用土地资源和农作物种植结构改革提供了基础依据。

关键词: 表层土壤; 土壤地球化学; 土壤养分; 土壤质量; 河北省

Geochemical assessment of the surface soil quality of cultivated land in Jingxing area, Hebei Province

GAO Ning¹, LU Yan¹, KANG Ning², MEI Xue-jia¹, BIAN Wen-ying¹, ZHOU Lu-zheng¹

1. Land Resources Exploration Center, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development
(Hebei Mining and Geological Disaster Emergency Rescue Center), Shijiazhuang 050081, China;

2. Hebei Geology and Mineral Construction Engineering Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China

Abstract: Soil geochemical assessment serves as an important reference for the rational utilization of land resources in agricultural planting. As an ecological conservation area of Shijiazhuang City, Jingxing County relies on agriculture as its primary industry. Taking Jingxing area as the study object, 158 surface soil samples are collected to analyze and evaluate the soil geochemical characteristics, abundance and deficiency of nutrient elements, environmental geochemistry and comprehensive grade. The results show that the comprehensive soil quality classification is predominantly Class I and II, indicating that the environmental geochemical grade of soil in the study area is clean, while the geochemical grade of soil nutrients is relatively abundant, which provides a fundamental basis for the rational utilization of land resources and reform of crops planting structure.

Key words: topsoil; soil geochemistry; soil nutrient; soil quality; Hebei Province

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-05-28. 编辑: 张哲.

基金项目: 河北省地质矿产勘查开发局重点项目“革命老区乡村振兴重点县(井陘)生态环境地质调查”(13000022P00329410085N).

作者简介: 郜宁(1991—), 男, 工程师, 从事水工环地质和自然资源调查工作, 通信地址 河北省石家庄市桥西区中山西路 800 号, E-mail//511796625@qq.com

通信作者: 梅学嘉(1988—), 男, 高级工程师, 从事水工环地质和自然资源调查工作, 通信地址 河北省石家庄市桥西区中山西路 800 号, E-mail//807124640@qq.com

引用格式: 郜宁, 芦岩, 康宁, 梅学嘉, 边文英, 周路征. 河北井陘地区耕地表层土壤质量地球化学评价[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 339-351.

Gao N, Lu Y, Kang N, Mei X J, Bian W Y, Zhou L Z. Geochemical assessment of the surface soil quality of cultivated land in Jingxing area, Hebei Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 339-351.

0 引言

土地资源是人类赖以生存的重要自然资源,耕地是土地资源的重要组成部分,可以为人类生存发展提供养育功能,也是保证粮食安全的重要战略资源之一^[1-5],土壤中的养分是农作物生长所必需的营养元素,了解土壤养分分布状况是发展精准农业的前提^[6-8],土壤质量地球化学评价是依据影响土壤质量的营养有益元素和重金属元素等地球化学指标,及其对土地基本功能的影响程度而进行的土壤质量地球化学等级评定^[9]。

近年来,由于工业化发展和大量施用化肥农药导致土壤养分流失和重金属污染,一大批学者在该领域开展调查与研究,包括土壤重金属元素分布特征^[10-12]、土壤地球化学质量等级评价^[13-14]、特色土地资源(如富硒、富锌土地)开发利用^[15-16]、土壤和农作物相关性^[17-18]和农业种植结构调整^[19]等方面研究,为摸清

土地资源现状和支撑与服务乡村振兴发挥了积极作用。

研究区内土地质量调查评价成果较少,现有研究^[20]认为井陘地区不适宜耕作,本研究对井陘地区耕地资源进行了系统评价,基本查明了研究区表层土壤地球化学特征、土壤养分丰缺性、土壤环境质量和土壤质量地球化学等级,以期当地土地资源利用、农业种植结构和农作物开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省石家庄市西部,包括井陘县和井陘矿区,地处太行山东麓中段,耕地总面积为381.63 km²(图1)。研究区属于北温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,多年平均气温13℃,极端最高气温42.8℃(1961年6月10日),极端最低气温-17.1℃(1952年2月9日),多年平均降水量578.85 mm,最大降水量为1250.8 mm(1963年),最小为243.6 mm

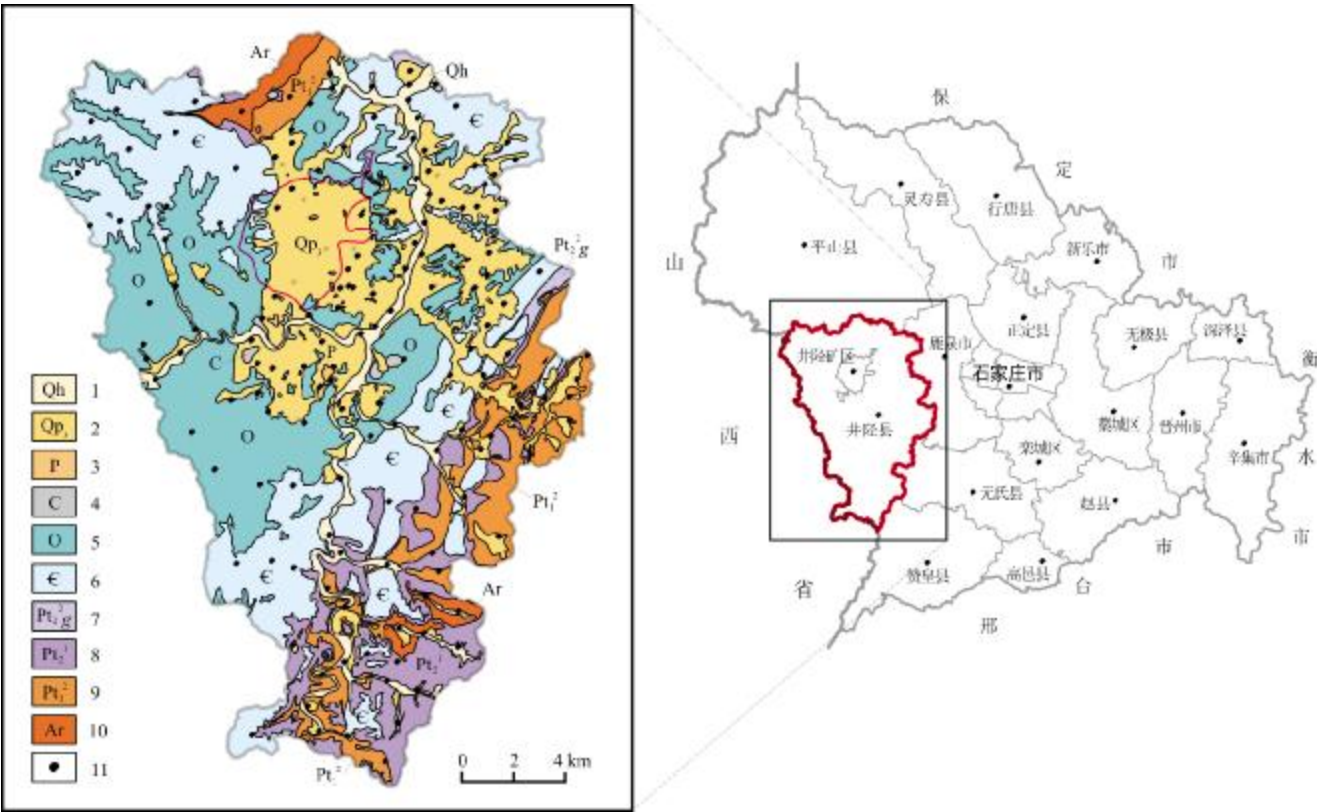


图1 研究区成土母岩及取样点位置图

Fig. 1 Location map of parent rocks and sampling points in the study area

1—第四系全新统(Quaternary Holocene); 2—第四系上更新统(Quaternary Upper Pleistocene); 3—二叠系(Permian); 4—石炭系(Carboniferous); 5—奥陶系(Ordovician); 6—寒武系(Cambrian); 7—长城系高于庄组(Changchengian Gaoyuzhuang fm.); 8—长城系一段(Changchengian 1st mem.); 9—滹沱群(Hutuo gr.); 10—太古宇(Archaean); 11—调查点(survey point)

(1972 年). 整体地势西高东低,呈现盆地地貌特征. 受太行山屏障影响,年平均风速低,静风小风频率高,日平均风速小于等于 1.5 m/s 的天数平均占全年的 65%. 井陉地区为纯山区县,区内耕地分布特点为梯田和岗坡底,耕地零散,地块小,主要分布在河流两侧、盆地和西部山区,其中绵河、冶河两侧耕地分布较为平缓,基本连片,地块面积较大^[21]. 农业种植以小麦、玉米、苹果、核桃和豆类为主. 区内成土母岩类型为第四纪冲积物及碳酸盐岩、碎屑岩、变质岩(图 1).

2 样品采集和分析测试

土壤分析样品采用网格加图斑的布设原则,均布设至耕地内,每个样品由 1 个主采样点、4~6 个子采样点组成. 子样点和主样点在同一地块,相距 20~50 m,将主采样点和子采样点充分混合后用四分法留取检测样品. 共采集表层土壤样品 158 件,采样深度为 0~20 m.

样品分析测试依据《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T0279—2016)等相关技术标准,由河北省地球物理勘查院实验室完成. 测试包括 N、P、K 及其有效态在内的 30 项指标(表 1).

为查明研究区元素分布特征和土壤肥力、土壤环境质量情况,实现土壤质量地球化学综合评价,参照《土壤环境质量农用地土壤污染管控标准(GB15618—2018)》和《土地质量地球化学评价规范(DZ/T0295—2016)》,选取 N、P、K 及其有效态和 Mn、Co、Mo、B、S、Cu、Zn 作为土壤养分评价指标,pH 值、Cr、Pb、Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cd 作为土壤环境评价指标,Se、I 作为土壤有益元素评价指标.

3 结果与讨论

3.1 土壤化学元素含量特征

对研究区内土壤化学元素指标进行统计分析(表 2)显示,部分元素指标符合正态分布,Cd、Co、C_{org}、Cu、

表 1 土壤样品测试项目及分析方法
Table 1 Soil sample testing items and analysis methods

检测项目	检测方法	检测仪器	检出限
Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Sr、Mo、Cd、Pb	固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法(HJ766-2015)	ICAP Q 系列电感耦合等离子体质谱仪	2.0、1.2、1.4、5、0.1、0.01、2
As、Hg、Se	土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法(HJ680-2013)	AFS-8510 原子荧光分光光度计	0.5、0.0002、0.01
pH	土壤 pH 的测定(NY/T 1377-2007)	PHS-3C	0.1
有效磷	森林土壤磷的测定(LY/T 1232-2015 4.1)	T6-新世纪 紫外可见分光光度计	0.25
速效钾	森林土壤钾的测定(LY/T 1234-2015 4)	GGX-900 原子吸收分光光度计	1.25
N	森林土壤氮的测定(LY/T 1228-2015 3.1)	滴定管	10
B	《岩石矿物分析》(第四版)84.2.16	CCD-I 型平面光栅电弧直读发射光谱仪	0.5
I	区域地球化学样品分析方法 第 24 部分:碘量测定电感耦合等离子体质谱法(DZ/T 0279.24-2016)	T6-新世纪 紫外可见分光光度计	0.2
水解性氮	森林土壤氮的测定(LY/T 1228-2015 4)	滴定管	1.25
C _{org}	森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算(LY/T 1237-1999)	酸式滴定管	0.05
P、Mn、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 、CaO、Na ₂ O、K ₂ O、MgO	区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279.1-2016)	Axios max X 射线荧光光谱仪	5、3、0.05、0.02、0.02、0.03、0.03、0.02、0.02
S	《岩石矿物分析》(第四版)第四分册 第 84 章 地球化学调查样品分析 84.2.2 X 射线荧光光谱法测定氯、溴、硫	Axios max X 射线荧光光谱仪	50

含量单位:K₂O、CaO、MgO、Fe₂O₃、SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、C_{org} 为%,其余为 10⁻⁶.

表 2 土壤化学分析指标统计表

Table 2 Statistics of soil chemical analysis indicators

指标	最小值	最大值	算术平均数	标准离差	变异系数	偏度	峰度	河北平原背景值	全国土壤 A 层平均值
Al ₂ O ₃	10.63	16.81	13.90	0.88	6.33	-0.66	3.05	12.73	15.97
As	3.25	14.30	8.63	1.78	20.62	-0.10	0.34	9.5	11.2
B	33.82	104.51	53.60	11.46	21.37	1.58	3.38	46.77	47.8
CaO	0.96	13.91	5.45	2.30	42.2	0.78	1.74	4.32	2.16
Cd	0.08	0.61	0.20	0.07	37.72	2.72	10.25	0.15	0.1
Co	7.77	25.44	12.44	1.73	13.91	2.68	19.82	12.01	12.7
C _{org}	0.33	15.50	1.66	1.37	82.41	7.04	67.42	0.82	1.8
Cr	33.87	118.17	62.34	9.81	15.74	1.09	6.58	65.21	61
Cu	12.11	115.78	27.66	12.10	43.75	4.61	25.52	22.95	22.6
Fe ₂ O ₃	2.74	7.45	4.70	0.57	12.08	0.75	5.85	4.47	4.2
Hg	0.01	0.28	0.06	0.04	72.74	2.11	5.32	0.038	0.065
I	0.90	3.54	1.54	0.41	26.7	1.91	5.73	2.03	3.76
K ₂ O	1.01	8.12	3.37	1.20	35.68	1.23	2.22	2.41	2.24
MgO	1.62	3.97	2.20	0.29	13.3	2.10	8.79	2.07	1.29
Mn	409.20	943.10	636.44	67.86	10.66	-0.03	3.64	588.89	583
Mo	0.46	1.37	0.73	0.14	19.62	1.42	3.33	0.55	2
N	369.46	3424.61	1361.95	488.52	35.87	1.15	2.67	1049	
Na ₂ O	0.65	1.71	1.23	0.15	12.21	-0.57	2.12	1.85	1.38
Ni	17.15	51.45	29.10	3.89	13.36	0.94	7.31	28.06	26.9
P	529.60	5576.70	1307.28	698.09	53.4	3.04	12.46	1012	
Pb	11.65	51.10	23.07	4.72	20.44	1.53	7.19	22.56	26
pH	6.40	8.49	8.03	0.25	3.17	-2.11	10.26	8.16	
S	92.40	990.00	299.22	106.79	35.69	2.32	11.30	337.52	
Se	0.03	3.39	0.45	0.32	71.12	5.21	44.83	0.19	0.29
SiO ₂	46.48	65.43	58.80	2.97	5.05	-1.37	3.43	60.58	
Sr	76.36	259.57	159.96	30.22	18.89	0.40	0.73	196	167
Zn	38.49	441.00	97.40	58.21	59.76	4.25	20.07	69.63	74.2
有效磷	1.82	257.98	49.75	54.61	109.77	1.76	2.75		
碱解氮	19.16	649.00	93.88	58.07	61.86	5.95	53.42		
速效钾	83.73	829.00	222.03	111.22	50.09	2.55	10.23		

含量单位:K₂O、CaO、MgO、Fe₂O₃、SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、C_{org} 为%,其余为 10⁻⁶;变异系数单位为%.

Hg、MgO、P、pH、S、Se、Zn、速效钾、碱解氮等指标具有较高的偏度和峰度值,对其进行对数转化后,Co、Hg、 C_{org} 、S、MgO、P、Se、Cd以及速效钾、碱解氮服从对数正态分布,Cu、pH和Zn服从近似对数正态分布。

研究区内表层土壤主要呈现碱性,pH值为6.40~8.49,与河北平原背景值^[22]相比,研究区 Al_2O_3 、B、CaO、Cd、Co、 C_{org} 、Cu、 Fe_2O_3 、Hg、 K_2O 、MgO、Mn、Mo、N、Ni、P、Pb、Se、Zn等19项指标均值高于背景值,其中Se和 C_{org} 比值较高,分别为河北平原背景值的2.37和2.02倍,说明Se和 C_{org} 在研究区内强烈富集; Na_2O 、I、Sr、S、As、Cr、 SiO_2 、pH等8项指标均值低于背景值,其中 Na_2O 和I比值最低,分别为河北平原背景值的0.66和0.76倍(图2a)。与全国土壤A层平均值^[23]相比,研究区CaO、Cd、MgO、Se、 K_2O 、Zn、Cu、 Fe_2O_3 、B、Mn、Ni、Cr等12项指标均值高于全国平均值,其中CaO和Cd比值较高,分别为全国平均值的2.52和2.00倍;Co、Sr、Hg、 Na_2O 、Pb、 Al_2O_3 、 C_{org} 、As、I、Mo等10项指标均值低于全国土壤A层平均值,其中I和Mo比值最低,分别为全国平均值的0.41和0.37倍(图2b)。总体上,研究区内土壤中 C_{org} 、Se、Mo、B、Mn等有益元素和氮、磷、钾

大量养分元素较为丰富,Cd、Co、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等有害金属元素含量高于河北平原背景值,其中的Co、Hg、Pb低于全国土壤A层平均值,As、Cr等有害金属元素含量较低,I元素含量明显低于平均水平。在井陉地区也确实存在过碘缺乏病(IDD),通过食用碘盐和口服碘油丸,2004年完成了碘缺乏病的防治任务。研究区位于碳酸盐岩盆地和沟谷内,其地球化学沉积环境是元素富集的主要原因。另外研究区内有煤矿开采和运输的历史,有“百年煤都”之称,根据前人研究成果,煤中富含多种微量元素和金属元素^[24-25],区内多种元素的富集也与煤有关。

变异系数可以反映土壤中化学元素分布的均匀情况^[26],pH、 SiO_2 、 Al_2O_3 、Mn、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、MgO、Ni、Co、Cr等10个指标变异系数小于15%,为轻度变异,表示分布均匀;Sr、Mo、Pb、As、B、I等6项指标变异系数在15%~35%之间,具有中等变异性,表示分布相对均匀,局部有富集现象;其他如氮、磷、钾及其有效性和S、Cd、Cu等14项指标变异系数在35%以上,特别是 C_{org} 、Se、Hg等元素变异系数在70%以上,为高度变异,表示分布极不均匀。

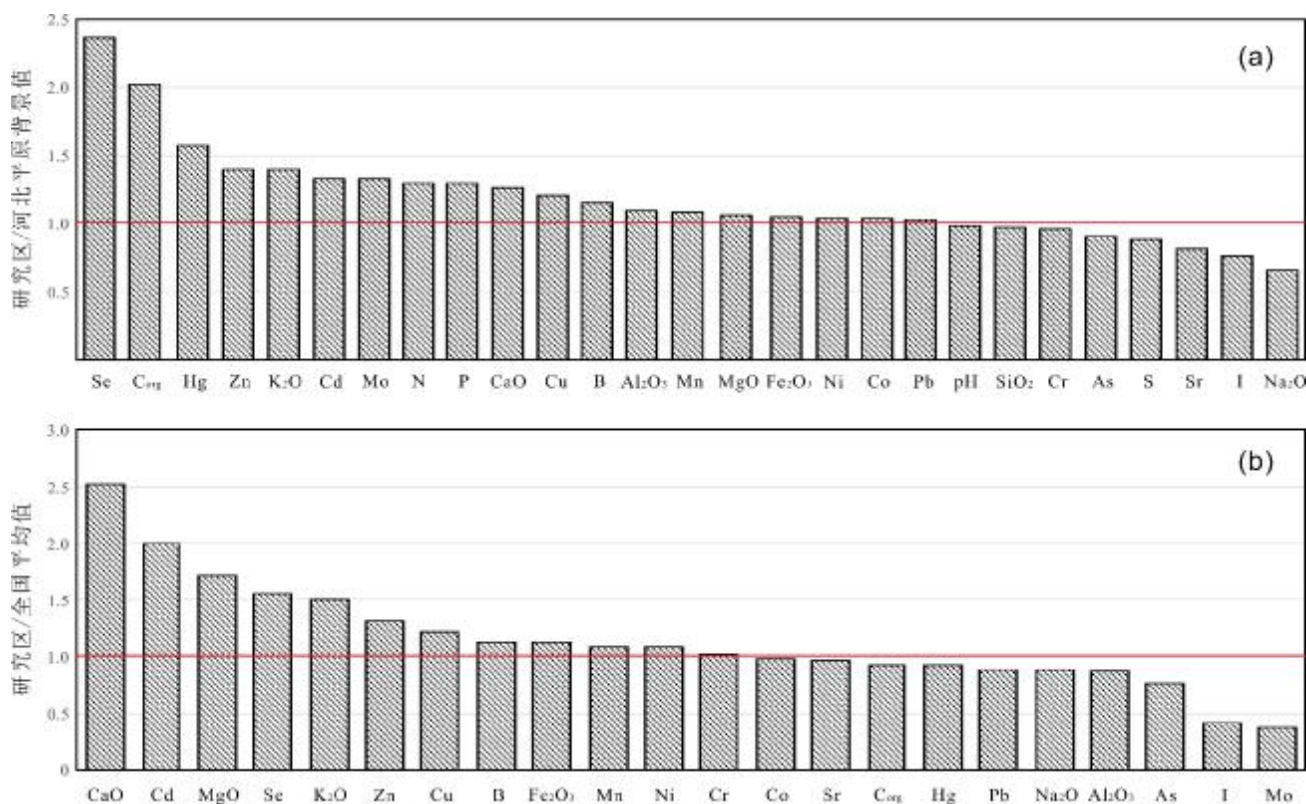


图2 研究区土壤各指标与河北平原及全国平均值对比图

Fig. 2 Ratios of soil indicator values in the study area to Hebei Plain and national averages

表 3 土壤指标因子载荷系数表
Table 3 Factor loading coefficients of soil indexes

因子	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Cr	0.024	-0.150	0.891	0.056	-0.201	0.229	-0.033	-0.045
Co	0.028	0.187	0.932	0.063	-0.111	0.033	0.062	-0.040
Ni	-0.047	0.021	0.916	-0.046	-0.219	0.201	0.023	-0.050
Cu	0.718	0.031	0.134	0.044	-0.112	0.440	0.061	-0.045
Zn	0.480	-0.135	0.016	0.474	-0.067	0.549	-0.092	-0.072
Sr	-0.005	-0.162	-0.036	0.072	0.129	0.357	-0.751	0.152
Mo	0.229	-0.142	0.195	0.200	0.137	0.720	-0.096	0.032
Cd	0.402	0.056	0.162	0.234	0.019	0.500	-0.322	0.273
Pb	-0.009	-0.034	0.195	0.115	-0.042	0.720	-0.092	0.306
As	-0.219	-0.229	0.099	-0.173	-0.367	0.595	0.177	0.144
Hg	0.076	0.059	-0.123	0.170	-0.032	0.111	-0.029	0.621
Se	0.065	-0.038	-0.074	0.155	0.236	0.185	-0.226	0.739
I	0.038	-0.389	0.160	-0.188	-0.025	0.077	0.365	0.637
B	0.021	-0.080	0.031	0.207	0.100	0.073	0.817	0.021
速效钾	0.414	-0.588	0.096	0.019	-0.117	0.046	0.203	-0.015
有效磷	0.883	-0.128	-0.075	0.119	0.127	0.055	-0.044	0.041
碱解氮	0.264	-0.161	0.053	0.855	0.023	0.076	0.204	-0.017
C _{org}	-0.010	-0.348	-0.016	0.874	0.009	0.195	-0.020	0.122
N	0.617	-0.066	0.118	0.559	0.058	0.002	0.233	0.226
pH	-0.774	-0.176	-0.102	-0.164	-0.062	0.244	-0.065	0.033
P	0.890	0.031	-0.115	0.160	0.011	0.162	-0.093	0.163
S	0.392	-0.070	0.027	0.808	-0.160	0.078	-0.061	0.252
Mn	0.229	0.271	0.417	0.064	-0.556	0.157	0.094	0.026
SiO ₂	0.094	0.887	-0.077	-0.272	-0.150	-0.171	0.004	-0.082
Al ₂ O ₃	0.024	0.896	0.088	-0.253	0.020	-0.011	0.033	-0.025
Fe ₂ O ₃	0.079	0.752	0.438	-0.041	-0.256	-0.139	0.205	-0.010
CaO	-0.059	-0.156	-0.355	-0.141	0.791	0.056	-0.306	0.072
Na ₂ O	0.106	0.348	-0.017	-0.179	-0.720	-0.147	-0.274	-0.099
K ₂ O	0.400	-0.035	-0.212	0.052	0.720	-0.167	-0.073	0.238
MgO	0.108	0.255	-0.143	-0.124	0.831	-0.042	0.126	-0.083
特征值	4.225	3.335	3.308	3.253	3.170	2.684	1.984	1.810
方差贡献/%	14.083	11.116	11.026	10.842	10.568	8.947	6.614	6.035
累积贡献/%	14.083	25.199	36.224	47.066	57.634	66.581	73.195	79.230

将研究区内 158 件土壤样品进行因子分析, KMO 和 Bartlett 球形检验结果分别为 0.727 和 4573 (df=435, $p<0.001$), 表明数据适合做因子分析. 经最大方差法旋转后, 提取 8 个主因子, 累计总方差贡献率为 79.23%(表 3).

F1 因子方差贡献为 14.083%, 主要由 P、有效磷、pH、Cu、N 指标组成, pH 具有较高的负载荷, 其他指标具有较高的正载荷, 且空间变异性较大, 主要受施肥、灌溉等人类活动等因素控制; F2 因子方差贡献为 11.116%, 主要由 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 和速效钾指标组成, 速效钾具有较高的负载荷, 其他指标具有较高的正载荷, 分布较为均匀, 该组合主要受成土母岩、地貌类型等因素控制; F3 因子方差贡献为 11.026%, 主要由 Cr、Co、Ni 组成, 分布较为均匀, 该组合主要受主要受地形地貌和成土母岩影响; F4 因子方差贡献为 10.842%, 主要由 C_{org} 、碱解氮、S、N 指标组成, 该组合主要与地貌类型、成土母岩以及施肥、灌溉等相关人类活动有关; F5 因子方差贡献为 10.568%, 主要由 CaO、

MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、Mn 指标组成, 该组合主要受成土母岩和土地利用类型影响; F6 因子方差贡献为 8.947%, 主要由 Mo、Pb、As、Zn、Cd 指标组成, 该组合主要受污水灌溉和工农业活动控制; F7 因子方差贡献为 6.614%, 主要由 Sr 和 B 指标组成, 该组合主要与成土母岩和人类活动有关; F8 因子方差贡献为 6.035%, 主要由 Hg、Se、I 指标组成, 且分布不均匀, 该组合主要受污染、降尘等因素影响. 以上研究结果与孙璐等^[26]、张秀芝等^[27]研究成果基本一致.

3.2 土壤养分地球化学等级

3.2.1 土壤养分丰缺性评价

土壤养分是指植物所必需的、主要由土壤来提供的营养元素^[28]. 本研究大量养分元素包括 N、P、K 及其有效态和有机质, 微量营养元素选取 Mn、Co、B、Mo、Cu、Zn、S, 有益元素选取 Se 和 I. 分级标准及统计结果见表 4、5.

研究区内营养元素丰缺性与成土母岩有关(表 6). Co 与 Cu、Mn 为显著正相关(表 7), 丰富和较丰富占比

表 4 大量养分元素和微量营养元素含量分级和统计值
Table 4 Grading and statistical values of macronutrient and micronutrient contents

成分	一等(丰富)		二等(较丰富)		三等(中等)		四等(较缺乏)		五等(缺乏)	
	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%
N/ 10^{-3}	>2	7.09	>1.5~2	16.6	>1~1.5	62.62	>0.75~1	5.37	≤ 0.75	8.32
P/ 10^{-3}	>1	75.22	>0.8~1	16.23	>0.6~0.8	5.9	>0.4~0.6	2.37	≤ 0.4	0.28
K/ 10^{-3}	>25	1.96	>20~25	6.66	>15~20	16.09	>10~15	56.72	≤ 10	18.57
碱解氮/ 10^{-6}	>150	3.44	>120~150	9.62	>90~120	18.72	>60~90	55.93	≤ 60	12.3
有效磷/ 10^{-6}	>40	38.59	>20~40	19.6	>10~20	13.76	>5~10	16.32	≤ 5	11.74
速效钾/ 10^{-6}	>200	57.12	>150~200	21.03	>100~150	20.53	>50~100	1.32	≤ 50	0
有机质/ 10^{-3}	>40	1.34	>30~40	1.73	>20~30	7.95	>10~20	76.31	≤ 10	12.67
Co/ 10^{-6}	>15	2.3	>13~15	16.26	>11~13	74.16	>8~11	7.12	≤ 8	0.16
B/ 10^{-6}	>65	9.99	>55~65	16.24	>45~55	53.76	>30~45	20.01	≤ 30	0
Mo/ 10^{-6}	>0.85	12.87	>0.65~0.85	67.41	>0.55~0.65	15.34	>0.45~0.55	4.39	≤ 0.45	0
Mn/ 10^{-6}	>700	9.52	>600~700	73.35	>500~600	15.06	>375~500	2.07	≤ 375	0
S/ 10^{-6}	>343	22.03	>270~343	34.62	>219~270	30.81	>172~219	7.8	≤ 172	4.75
Cu/ 10^{-6}	>29	14.73	>24~29	48.73	>21~24	19.49	>16~21	16.93	≤ 16	0.12
Zn/ 10^{-6}	>84	55.33	>71~84	24.19	>62~71	16.81	>50~62	3.41	≤ 50	0.25

表 5 有益元素含量分级和统计值

Table 5 Grading and statistical values of beneficial element contents

元素	过剩		高		适量		边缘		缺乏	
	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%	分级标准	面积占比/%
Se/ 10^{-6}	>3.0	0.16	>0.40~3.0	63.03	>0.175~0.40	30.20	>0.125~0.175	3.50	≤0.125	3.11
I/ 10^{-6}	>100	0.00	>5~100	0.00	>1.50~5	47.53	>1~1.50	51.14	≤1	1.34

表 6 营养元素丰缺性与成土母岩关系占比统计表

Table 6 Statistics of relationship between abundance/deficiency of nutrient elements and parent rocks

元素	第四系沉积物					碳酸盐岩					碎屑岩					变质岩				
	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏
Co	3	24	64	10	0	6	15	61	17	2	6	56	28	11	0	0	36	64	0	0
Cu	17	50	24	10	0	17	37	31	13	2	22	56	17	6	0	21	36	43	0	0
Zn	57	25	14	4	0	39	39	13	7	2	33	44	17	6	0	64	29	7	0	0
Mo	11	61	22	6	0	15	57	22	6	0	22	61	11	6	0	14	43	36	7	0
B	14	10	50	26	0	19	26	44	11	0	11	28	50	11	0	7	21	36	36	0
C _{org}	4	11	15	61	8	0	0	4	69	28	0	0	22	56	22	0	0	7	79	14
N	8	21	56	10	6	9	20	50	9	11	17	22	33	11	17	14	21	57	7	0
P	74	17	10	0	0	59	26	11	4	0	39	39	11	11	0	71	21	7	0	0
S	32	32	28	4	4	15	22	37	19	7	28	28	22	17	6	21	50	29	0	0
Mn	17	58	18	7	0	7	70	20	2	0	22	67	11	0	0	21	50	29	0	0
K	6	8	21	43	22	2	11	13	57	17	0	0	22	39	39	0	7	29	36	29

元素	第四系沉积物					碳酸盐岩					碎屑岩					变质岩				
	过剩	高	适量	边缘	缺乏	过剩	高	适量	边缘	缺乏	过剩	高	适量	边缘	缺乏	过剩	高	适量	边缘	缺乏
Se	1	58	36	3	1	0	48	37	6	11	0	39	50	6	6	0	36	57	0	7
I	0	0	46	53	1	0	0	57	39	4	0	0	33	67	0	0	0	43	50	7

单位为%.

较高的成土母岩以碎屑岩和变质岩为主, 缺乏和较缺乏占比较高的成土母岩主要为碳酸盐岩; C_{org} 与 S、Zn 为显著正相关, 丰富占比较高的成土母岩以第四纪沉积物为主, 较缺乏和缺乏占比较高的成土母岩以碎屑岩为主; Se 在区内含量占比较高, 在基岩类成土母岩中沉积岩碎屑岩类 (0.428×10⁻⁶)>沉积岩碳酸盐岩类 (0.354×10⁻⁶)>变质岩类 (0.349×10⁻⁶), 碎屑岩类 Se 含量较高的成土母岩为石炭-二叠系煤系地层和黑色页岩, 与前人研究认为土壤 Se 异常与煤矿之间存在渊源

关系的结论一致^[27, 29-30].

研究区内 Se、Zn、Cu 等有益元素含量丰富, 由于本研究土壤样品有限, 需要有相关资质的单位进行并陘地区营养有益元素详查工作, 以查明有益营养元素的分布特征和来源途径, 为该地区农业发展和农作物种植结构改革提供依据.

3.2.2 土壤养分地球化学综合评价

在 N、P、K 土壤单指标养分地球化学等价划分的基础上进行土壤养分地球化学综合评价, 计算公式为:

表 7 营养元素含量相关性

Table 7 Correlation of nutrient element contents

元素	Co	C _{org}	N	P	Mn	K	B	S	I	Se	Mo	Zn	Cu
Co	1	-0.02	0.11	-0.07	0.47**	-0.28**	0.07	0.09	0.06	-0.13	0.2*	0.09	0.24**
C _{org}		1	0.50**	0.18*	-0.03	0.09	0.2*	0.78**	0.09	0.3**	0.35**	0.57**	0.13
N			1	0.64**	0.22**	0.35**	0.29**	0.70**	0.17*	0.2*	0.26**	0.45**	0.42**
P				1	0.17*	0.40**	-0.02	0.54**	0.05	0.25**	0.3**	0.56**	0.7**
Mn					1	-0.38**	0.13	0.21**	0.02	-0.15	0.05	0.17*	0.28**
K						1	0.08	0.13	0.06	0.35**	0.04	0.10	0.11
B							1	0.12	0.28**	-0.12	0.03	0.06	0.06
S								1	0.03	0.35**	0.34**	0.59**	0.35**
I									1	0.38**	0.12	0.05	0.08
Se										1	0.26**	0.23**	0.14
Mo											1	0.62**	0.45**
Zn												1	0.74**
Cu													1

** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)显著相关; * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)显著相关; $n=158$.

$$f_{\text{养综}} = \sum_{i=1}^n k_i f_i$$

式中: $f_{\text{养综}}$ 表示土壤氮、磷、钾评价总得分, $1 \leq f_{\text{养综}} \leq 5$; k_i 为氮、磷、钾权重系数,分别为 0.4、0.4、0.2; f_i 表示土壤氮、磷、钾的单元素等级得分,单指标评价结果为五等、四等、三等、二等、一等时所对应的 f_i 得分分别为 1 分、2 分、3 分、4 分、5 分. $f_{\text{养综}} \geq 4.5$ 代表养分丰富(一等), $3.5 \leq f_{\text{养综}} < 4.5$ 代表养分较丰富(二等), $2.5 \leq f_{\text{养综}} < 3.5$ 代表养分中等(三等), $1.5 \leq f_{\text{养综}} < 2.5$ 代表养分较缺乏(四等), $f_{\text{养综}} < 1.5$ 代表养分缺乏(五等).

研究表明, 研究区表层土壤养分地球化学综合等级以较丰富(二等)为主, 面积为 243.69 km², 占比为 63.86%, 广泛分布在研究区内; 丰富(一等)面积为 22.02 km², 占比 5.77%, 主要分布在小作镇和吴家窑一带; 中等(三等)面积为 87.28 km², 占比 22.87%, 主要分布在测鱼镇、横涧乡至南障城镇一带和南陉乡南部等地; 较缺乏(四等)和缺乏(五等)面积为 28.64 km², 占比为 7.50%, 主要分布在南峪镇、秀林镇和南障城镇北部(表8).

表 8 土壤养分地球化学综合评价统计表

Table 8 Comprehensive geochemical grade assessment of soil nutrients

等级	一等	二等	三等	四等	五等
面积/km ²	22.02	243.69	87.28	21.27	7.37
占比/%	5.77	63.86	22.87	5.57	1.93

3.3 土壤环境地球化学等级

3.3.1 土壤酸碱度

土壤酸碱度直接影响土壤中各类元素的丰缺程度^[31-33]. 研究区内表层土壤 pH 值为 6.4~8.49, 平均值为 8.03, 中位数为 8.08. 根据评价, 区内表层土壤以碱性为主, 占研究区面积的 98.04%, 中性土壤占 1.48%, 酸性土壤占 0.48%. 这与研究区土壤母质以碳酸盐岩为主有密切关联.

3.3.2 土壤环境地球化学单指标和综合评价

将研究区内表层土壤中 8 个元素参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)中风险筛选值, 运用尼梅罗综合污染指数法进行

单指标评价. 结果显示, Cr、Ni、As、Hg、Pb 综合污染指数全部小于 1, 土壤环境为清洁; Zn、Cu、Cd 综合污染指数大部分小于 1, 土壤环境为清洁, 仅 2~5 个样品指数为 1.02~1.82, 土壤环境为轻微污染. 土壤质量基本上未受到污染. 根据研究表明, 有些微量元素如 Mn、Cu、Zn、Co、Ni、Pb 与有机物可形成稳定的化合物, 难以被植物吸收, 从而减少毒性^[34]. 因此可以通过增加土壤有机物含量, 从而减少研究区 Zn、Cu 等元素的活性.

土壤环境综合等级以清洁为主, 面积为 364.58 km², 占研究区面积的 95.53%, 广泛分布于研究区; 轻微污染面积为 17.05 km², 占研究区面积的 4.47%, 主要分布于康庄至北岭一带、冶西至赵西岭一带、上坡头附近、南芦庄一带和井陉矿区凤山镇东南部(表 9). 根据现场调查发现, 土壤轻微污染区域上坡头和冶西至赵西岭一带有工厂, 其污染离子 Cr 和 Cd 推测与工业有关, Cu 离子推测与喷洒农药有关. 另外研究区处于太行山中段, 为盆地地貌, 受太行山屏障影响, 年平均风速低, 静风小风频率高, 阻挡了空气污染物的扩散, 致使近地面空气污染物累积, 降水将空气中污染物淋滤至土壤中, 使土壤出现污染情况.

表 9 土壤环境地球化学综合评价统计表

Table 9 Comprehensive geochemical grade assessment of soil environment

等级	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
面积/km ²	364.58	17.05	0.00	0.00	0.00
占比/%	95.53	4.47	0.00	0.00	0.00

3.4 土壤质量地球化学综合等级

土壤质量地球化学综合等级由土壤养分地球化学等级与土壤环境地球化学等级叠加产生(图 3). 研究区内土壤质量较好, 以一等和二等为主, 面积为 339.47 km², 占研究区面积的 88.95%, 在全区内广泛分布, 该等级耕地土壤养分等级在中等以上, 土壤环境等级为清洁; 土壤质量三等面积为 34.79 km², 占研究区面积的 9.12%, 主要分布在冶西至赵西岭一带、薛家庄至北岭一带、上坡头附近、南芦庄一带、王庄南部、常桥上至北峪一带、荆蒲兰附近、郝西河至吴家庄一带、秀林至马峪一带、梅庄至北障城一带和井陉矿区凤山镇东南部, 该等级耕地土壤养分等级为较缺乏, 土壤环境等级为清洁, 或者土壤养分等级为较缺乏至丰富, 土壤环境等

级为轻微污染; 土壤质量四等面积为 7.37 km², 占研究区面积的 1.93%, 主要分布在张家庄南部、东尖山北部和汪里至固兰一带, 该等级土壤养分等级为缺乏, 土壤环境等级为清洁或轻微污染. 由此得出, 研究区表层土壤质量综合等级为优质级, 土壤环境等级以清洁为主, 基本上未受到污染影响, 土壤养分等级以较丰富为主. 可通过改变耕作方式和种植结构, 最大限度地发挥井陉地区耕地质量的优势.

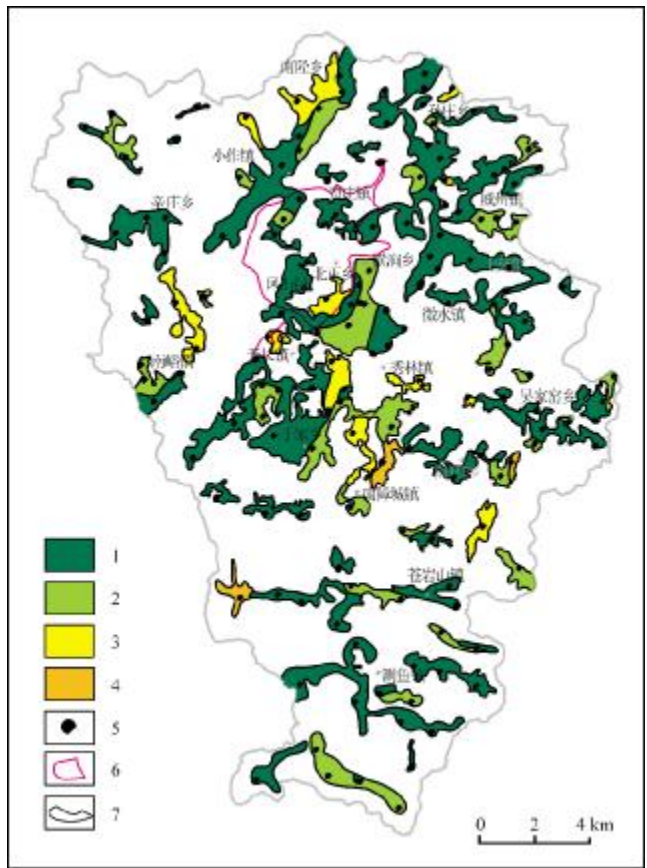


图 3 井陉地区土壤质量地球化学综合评价图

Fig. 3 Comprehensive geochemical assessment map of soil quality in Jingxing area

1— 一等(Grade I); 2—二等(Grade II); 3—三等(Grade III); 4—四等(Grade IV); 5—调查点(survey point); 6—井陉矿区(Jingxing mining area); 7—耕地范围(cultivated land)

3.5 土地施肥建议

根据土壤养分元素丰缺性评价结果, 提出相应的施肥建议(图 4): 研究区 27.15% 的耕地区域(103.61 km²) 氮磷钾均不缺, 建议保持现状; 1.93% 的区域(7.37 km²) 磷钾平衡, 缺氮, 建议适当增加氮肥; 59.83% 的区域(228.3 km²) 氮磷平衡, 缺钾, 建议适当增加钾肥; 8.91% 的区域(34 km²) 磷平衡, 缺氮钾, 建议适当增加

氮肥和钾肥; 2.19%的区域(8.35 km²)氮磷钾均缺, 建议适当增加氮磷钾肥的施用。

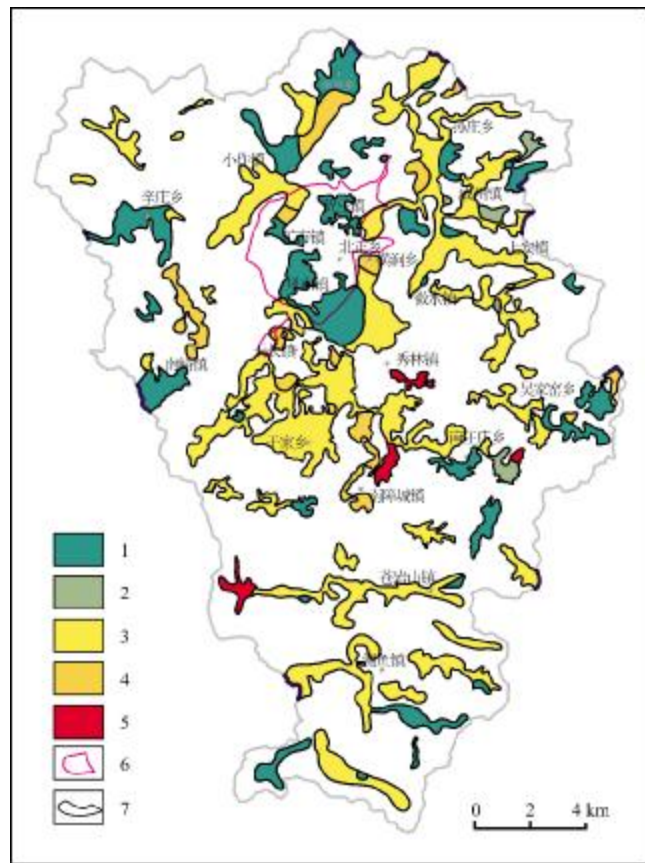


图4 井陘地区土壤平衡施肥建议图

Fig. 4 Suggestion map for soil balanced fertilization in Jingxing area

1—氮磷钾均不缺 (no deficiency of NPK); 2—磷钾平衡缺氮 (PK balance and N deficiency); 3—氮磷平衡缺钾 (PN balance and K deficiency); 4—磷平衡缺氮钾 (P balance and NK deficiency); 5—氮磷钾均缺 (deficiency of NPK); 6—井陘矿区 (Jingxing mining area); 7—耕地范围 (cultivated land)

4 结论

(1) 河北省井陘地区耕地表层土壤 30 项分析指标中 Al_2O_3 、B、CaO 等 17 项指标服从正态分布, Cd、Co、 C_{org} 等 13 项指标服从对数正态分布, Cu、pH 和 Zn 服从近似对数正态分布。研究区表层土壤多呈碱性, Al_2O_3 、B、CaO、Cd、Co、 C_{org} 、Cu、 Fe_2O_3 、Hg、 K_2O 、MgO、Mn、Mo、N、Ni、P、Pb、Se、Zn 等 19 项指标均值高于河北平原背景值, Na_2O 、I、Sr、S、As、Cr、 SiO_2 、pH 等 8 项指标均值低于河北平原背景值。

(2) 研究区大量营养元素 N 多为中等区, 占比为

62.62%; P 元素多为丰富区, 占比为 75.22%; K 和有机质多为较缺乏区, 占比分别为 56.72% 和 76.31%。微量营养元素中 Co 和 B 多为中等区, 占比为 74.16% 和 53.76%; Mo、Mn、Cu 和 Zn 多为较丰富区, 占比分别为 67.41%、73.35%、48.73% 和 52.42%; S 多处于中等—较丰富区, 占比为 65.43%。有益元素中 Se 多为高值区, 占比为 63.03%; I 多为边缘区, 占比为 65.43%。元素含量与地貌类型、成土母岩和人类活动有关。

(3) 土壤丰缺性与成土母岩有关, Co 与 Cu、Mn 为一组别, 丰富和较丰富占比较高的成土母岩以碎屑岩和变质岩为主, 缺乏和较缺乏占比较高的成土母岩主要为碳酸盐岩; C_{org} 与 S、Zn 为一组别, 丰富占比较高的成土母岩以第四系沉积物为主, 较缺乏和缺乏占比较高的成土母岩以碎屑岩为主; Se 高值区成土母岩主要为第四系沉积物。

(4) 研究区表层土壤养分地球化学等级以较丰富为主, 其中 N 和速效钾以中等为主, P 和有效磷以丰富为主, K、有机质和碱解氮以较缺乏为主。土壤环境地区化学等级以清洁为主, 基本未受污染, 个别地区受到 Cd、Cr、Cu 污染。土壤质量综合等级大面积地区为一等和二等, 表明研究区土壤环境清洁, 土壤养分较丰富。根据养分元素丰缺性提出了相应的施肥建议。

参考文献 (References):

- [1] 杨佳佳, 吕骏超, 金珊合, 等. 全球黑土区耕地动态变化及其驱动力 Logistic 回归分析[J]. 地质与资源, 2023, 32(5): 584–591. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.05.008.
- [2] Yang J J, Lyu J C, Jin S H, et al. Farmland dynamic change and its driving force analysis in global black soil regions based on logistic regression model[J]. Geology and Resources, 2023, 32(5): 584–591. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.05.008.
- [3] Samranpong C, Ekasingh B, Ekasingh M. Economic land evaluation for agricultural resource management in northern Thailand [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(12): 1381–1390.
- [4] 姚远, 李效顺, 曲福田, 等. 中国经济增长与耕地资源变化计量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 209–215.
- [5] Yao Y, Li X S, Qu F T, et al. Quantitative analysis of relationship between economy growth and cultivated land change in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 209–215.
- [6] 王亮, 王伟伟, 龚仓, 等. 四川成都唐昌镇表层土壤元素地球化学特征及质量评价[J]. 岩矿测试, 2022, 41(6): 1082–1094.
- [7] Wang L, Wang D W, Gong C, et al. Elemental geochemical

- characteristics of topsoil in Tangchang Town, Chengdu, Sichuan Province and quality evaluation [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(6): 1082–1094.
- [5] 鲍丽然, 李瑜, 贾中民, 等. 耕地质量地球化学评价及应用研究——以重庆市荣昌区为例[J]. *地球与环境*, 2018, 46(1): 96–105.
- Bao L R, Li Y, Jia Z M, et al. Geochemical assessment and applications of cultivated land: Taking Rongchang District, Chongqing City, China as an example[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(1): 96–105.
- [6] 张哲寰, 刘凯, 赵君, 等. 黑龙江省逊克平原土壤有机碳分布与变化特征[J]. *地质与资源*, 2024, 33(2): 202–208, 160. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.02.009.
- Zhang Z H, Liu K, Zhao J, et al. Distribution and variation characteristics of soil organic carbon in Xunke Plain, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(2): 202–208, 160. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.02.009.
- [7] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3292–3302.
- Zhang Z L, Liu F, Hou T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3292–3302.
- [8] 房娜娜, 刘凯, 刘国栋, 等. 黑土肥力质量评价的生物指标研究进展[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 518–524, 542. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.003.
- Fang N N, Liu K, Liu G G, et al. Research progress on biological indicators of black soil fertility quality evaluation [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 518–524, 542. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.003.
- [9] 李秋燕, 贺鹏飞, 魏明辉, 等. 内蒙古鄂伦春旗东部地区土地质量地球化学评价[J]. *地质与资源*, 2025, 34(2): 225–231. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2025.02.010.
- Li Q Y, He P F, Wei M H, et al. Geochemical evaluation of land quality in eastern Oroqen Qi, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2025, 34(2): 225–231. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2025.02.010.
- [10] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 431–441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 431–441.
- [11] 贺灵, 吴超, 曾道明, 等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(3): 384–396.
- He L, Wu C, Zeng D M, et al. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of Southwest China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(3): 384–396.
- [12] 董燕, 孙璐, 李海涛, 等. 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 172–181.
- Dong Y, Sun L, Li H T, et al. Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 172–181.
- [13] 康鹏宇, 刘传朋, 梁成, 等. 沂蒙山区土壤质量地球化学评价方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 877–886.
- Kang P Y, Liu C P, Liang C, et al. Geochemical evaluation method of soil quality in Yimeng Mountain area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 877–886.
- [14] 汤明, 吴海东, 姜明亮, 等. 安徽省石台县土地质量地球化学评价及应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(4): 338–345.
- Tang M, Wu H D, Jiang M L, et al. Geochemical evaluation and application of land quality in Shitai County, Anhui Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(4): 338–345.
- [15] 多吉卫色, 索朗次仁, 平措朗杰, 等. 西藏自治区隆子县土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(1): 177–191.
- Duojiweise, Suolangciren, Pingcuolangjie, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of soil selenium in Longzi County, Tibet Autonomous Region [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(1): 177–191.
- [16] 摆翔, 何峻岭, 蒋磊, 等. 铁门关市土壤硒含量分布特征及影响因素探讨[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(1): 143–152.
- Bai X, He J L, Jiang L, et al. Exploration on the distribution characteristics of soil selenium content in Tiemenguan City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(1): 143–152.
- [17] 夏飞强, 张祥, 杨艳, 等. 安徽省宁国市土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 585–593.
- Xia F Q, Zhang X, Yang Y, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils and agricultural products in Ningguo City, Anhui Province [J]. *Soils*, 2021, 53(3): 585–593.
- [18] 闫加力, 徐春燕, 杨军, 等. 湖北省不同区域土壤与农作物硒相关性研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(6): 121–123, 138.
- Yan J L, Xu C Y, Yang J, et al. Correlation study between crop selenium and its soil selenium in different regions of Hubei Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(6): 121–123, 138.
- [19] 吴峰, 王永, 向武, 等. 基于土壤地球化学特征的茶叶适生模式及种植区划研究——以浙江余杭为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 909–918.
- Wu F, Wang Y, Xiang W, et al. Establishment of a suitable model and planting division of tea: A case study based on soil geochemical characteristics in Yuhang, Zhejiang Province [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 909–918.

- [20]安磊,朱骥,邓馥荣. 石家庄市耕地适宜性评价[J]. 河北地质大学学报, 2023, 46(2): 78–86.
- An L, Zhu J, Deng F R. Suitability evaluation of cultivated land in Shijiazhuang[J]. Journal of Hebei Geo University, 2023, 46(2): 78–86.
- [21]杜卫兵,王欣. 井陘县耕地质量存在问题及对策[J]. 现代农村科技, 2023(3): 66.
- Du W B, Wang X. Jingxing county cultivated land quality problems and countermeasures[J]. Xiandai Nongcun Keji, 2023(3): 66. (in Chinese)
- [22]张秀芝,王俊达,王彩玲,等. 河北平原沧州-武强土壤地球化学异常解析[J]. 地球与环境, 2016, 44(6): 663–670.
- Zhang X Z, Wang J D, Wang C L, et al. Interpretation of soil geochemical abnormality in Cangzhou-Wuqiang area in Hebei Plain, China[J]. Earth and Environment, 2016, 44(6): 663–670.
- [23]中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 87–90.
- China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990: 87–90. (in Chinese)
- [24]Jiang Z S, Cheng Y X. Geographic distribution of Se and Kaschin-Beck disease in Shanxi Province, China[J]. Epidemiol, 1989(8): 42–45.
- [25]Block C, Dams R. Inorganic composition of Belgian coals and coal ashes[J]. Environmental Science & Technology, 1975, 9(2): 146–150.
- [26]孙璐,董燕,凤蔚,等. 雄安新区土壤地球化学特征及控制因素[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1715–1730.
- Sun L, Dong Y, Feng W, et al. Geochemical characteristics of soil elements and its driving mechanisms in the Xiong'an New Area, China[J]. Geographical Research, 2022, 41(6): 1715–1730.
- [27]张秀芝,魏静,葛秀珍,等. 开滦矿区煤伴生元素土壤地球化学分布模式及成因[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1140–1147.
- Zhang X Z, Wei J, Ge X Z, et al. Geochemical distribution and genesis of Se and associated elements in soil of Kailuan coal field[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(10): 1140–1147.
- [28]陈文静,蔡奎,栾文楼,等. 河北省任丘市表层土壤元素地球化学评价[J]. 地质论评, 2023, 69(2): 809–815.
- Chen W J, Cai K, Luan W L, et al. Geochemical evaluation of surface soil elements in Renqiu City, Hebei Province[J]. Geological Review, 2023, 69(2): 809–815.
- [29]Yudovich Y E, Ketris M P. Selenium in coal: A review [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 67(1/2): 112–126.
- [30]李生盛. 中国煤中有害微量元素研究中的问题及对策[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(1): 28–31.
- Li S S. Issues and countermeasures for research on harmful microelement in Chinese coal[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(1): 28–31.
- [31]张孝存,崔格冲,杨丽,等. 商洛金凤山地区人工林土壤 pH 值及养分特征分析[J]. 辽宁农业科学, 2020(3): 9–12.
- Zhang X C, Cui G C, Yang L, et al. Analysis on soil nutrient properties and pH of different forest land in Jinfeng Mountain in Shangluo[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020(3): 9–12.
- [32]周子方,解燕,易克,等. 马龙植烟土壤 pH 值分布特征及其主控因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 8–13.
- Zhou Z F, Xie Y, Yi K, et al. Distribution characteristics and influencing factors of pH value in tobacco growing soil in Malong[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(5): 8–13.
- [33]张驭航,李玲,王秀丽,等. 河南省土壤 pH 值时空变化特征分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1091–1100.
- Zhang Y H, Li L, Wang X L, et al. Temporal and spatial variation of soil pH in Henan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1091–1100.
- [34]龚子同. 中国土壤地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 216–217.
- Gong Z T. Soil geography of China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 216–217. (in Chinese)