



山西大同桑干河流域富锶土壤地球化学特征及资源潜力评价

刘军帅,郑吉林,蔡艳龙,魏小勇,郭晓宇,王大可,孙靖尧,杨志伟

中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心,黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要: 对山西大同桑干河流域富锶土壤的研究表明,其表层土壤锶元素含量为 $108.7 \times 10^{-6} \sim 413.9 \times 10^{-6}$,平均值为 261.7×10^{-6} ,是中国土壤 A 层的 1.57 倍。深层土壤锶元素含量为 $106.2 \times 10^{-6} \sim 467.0 \times 10^{-6}$,平均值 279.2×10^{-6} ,是中国土壤 C 层的 1.65 倍。区内表、深层土壤富锶是围岩在地下水的作用下,锶在水中溶解,随之迁移并在盆地富集的结果。区内前寒武纪变质岩中锶的含量最高达 $1\ 259 \times 10^{-6}$,是锶的主要物质来源。表、深层土壤中锶与 Ba、B、Cr、La、Nb、Na、As、Sb、Si 等关系密切。盐碱土是主要的储锶土壤类型。耕地中锶含量高于其他土地利用类型。通过富锶土壤资源潜力评价,圈出富锶土壤面积 $1\ 104\ \text{km}^2$,占调查区面积的 69.87%,其中适宜开发面积 $442\ \text{km}^2$ 。区内具有较好的富锶优质土地资源开发潜力。

关键词: 富锶土壤;地球化学特征;前寒武纪变质岩;资源潜力评价;桑干河;山西省

GEOCHEMISTRY AND RESOURCE POTENTIAL EVALUATION OF STRONTIUM-RICH SOIL IN SANGGAN RIVER BASIN OF DATONG, SHANXI PROVINCE

LIU Jun-shuai, ZHENG Ji-lin, CAI Yan-long, WEI Xiao-yong, GUO Xiao-yu,

WANG Da-ke, SUN Jing-yao, YANG Zhi-wei

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150000, China

Abstract: The study on the Sr-rich soil in Sanggan River basin of Datong, Shanxi Province, shows that the Sr content in surface soil is $108.7 \times 10^{-6} \sim 413.9 \times 10^{-6}$, averagely 261.7×10^{-6} , 1.57 times that of the Chinese soil layer A, while the Sr content in deep soil is $106.2 \times 10^{-6} \sim 467.0 \times 10^{-6}$, averagely 279.2×10^{-6} , 1.65 times that of the Chinese soil layer C. The enrichment of Sr in surface and deep soils is the result of dissolution of Sr in the surrounding rock by the process of groundwater, followed by migration and then enrichment in the basin. The Precambrian metamorphic rocks, in which the maximum Sr content is up to $1\ 259 \times 10^{-6}$, serve as the main material source of Sr. In surface and deep soils, Sr is closely related to the elements of Ba, B, Cr, La, Nb, Na, As, Sb and Si. Saline-alkali soil is the main type for Sr storage. Sr content in cultivated land is higher than that in other land use types. According to the evaluation of Sr-rich soil resource potential, the area of strontium-rich soil is $1\ 104\ \text{km}^2$, accounting for 69.87% of the study area, among which the area suitable for development is $442\ \text{km}^2$. It is concluded that the study area has good development potential of high-quality Sr-rich land resources.

Key words: strontium-rich soil; geochemistry; Precambrian metamorphic rock; resource potential evaluation; Sanggan River; Shanxi Province

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-09-16.编辑:李兰英.

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“太行山区山西段生态修复支撑调查”(DD20208069).

作者简介:刘军帅(1986—),男,从事生态地质调查工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路 1 号,E-mail//785396992@qq.com

通信作者:王大可(1991—),男,主要从事生态地质调查工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路 1 号,E-mail//592049257@qq.com

锶是人体必需的微量元素之一，是对于人体健康的有益元素^[1-4]。随着锶在人体中重要性研究的深入和人们对健康关注度的提高，富锶资源的开发利用具有较大的潜在价值。本研究利用太行山区山西段生态修复支撑调查资料，在对山西大同桑干河流域富锶土壤地球化学特征研究的基础上，进行富锶土壤资源潜力评价，为当地富锶土壤资源开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省大同市东南部桑干河流域，东至敖石，南至冯庄，面积 1 580 km²。其地处大同盆地内，年降水量 400 mm 左右，年均温 7 ℃左右，属温带半干旱地区干草原地带。盆地周围山麓地带普遍发育着洪积扇，组合成山麓倾斜平原。大同—朔州一带桑干河两岸，地面平坦宽广，为盆地的中心，是农业生产的重点地区。部分地势低洼的地方排水不良，有不同程度的盐渍化现象。主要土壤类型为栗褐土和栗钙土，

主要土地利用类型为耕地和林地。

研究区出露地层主要为新生界第四系、新近系(主要分布在北部平川区)，古生界石炭系、奥陶系、寒武系、和中元古界长城系(主要分布在南部山地丘陵区)(图 1)。第四系：沱阳组以粉细砂、粉砂土、薄层亚黏土为主；选仁组以粉砂土、亚砂土为主；方村组以漂砾、砾石、砂及亚砂土为主；峙峪组以亚砂土、亚黏土互层夹锈黄色中粒砂层；册田玄武岩主要为层状灰黄色玄武岩夹玄武质砂砾岩；马兰组为灰黄色亚砂土，垂直节理发育；泥河湾组为灰绿、灰黄色亚砂土、亚黏土互层夹薄层粉细砂或砂线。新近系保德组：砂砾石层夹棕红色砂质黏土。石炭系太原组：砂岩、炭质页岩、灰岩及泥岩夹煤层为主。奥陶系：马家沟组以白云质灰岩、泥质灰岩为主；三山子组主要为白云岩，含燧石结核。寒武系馒头组：紫红色页岩夹粉砂岩、白云岩为主。长城系高于庄组：燧石条带、结核—粉晶白云岩、白云质砂岩。古元古界变质辉绿岩，黑绿色、细粒变晶结构，块状构造。

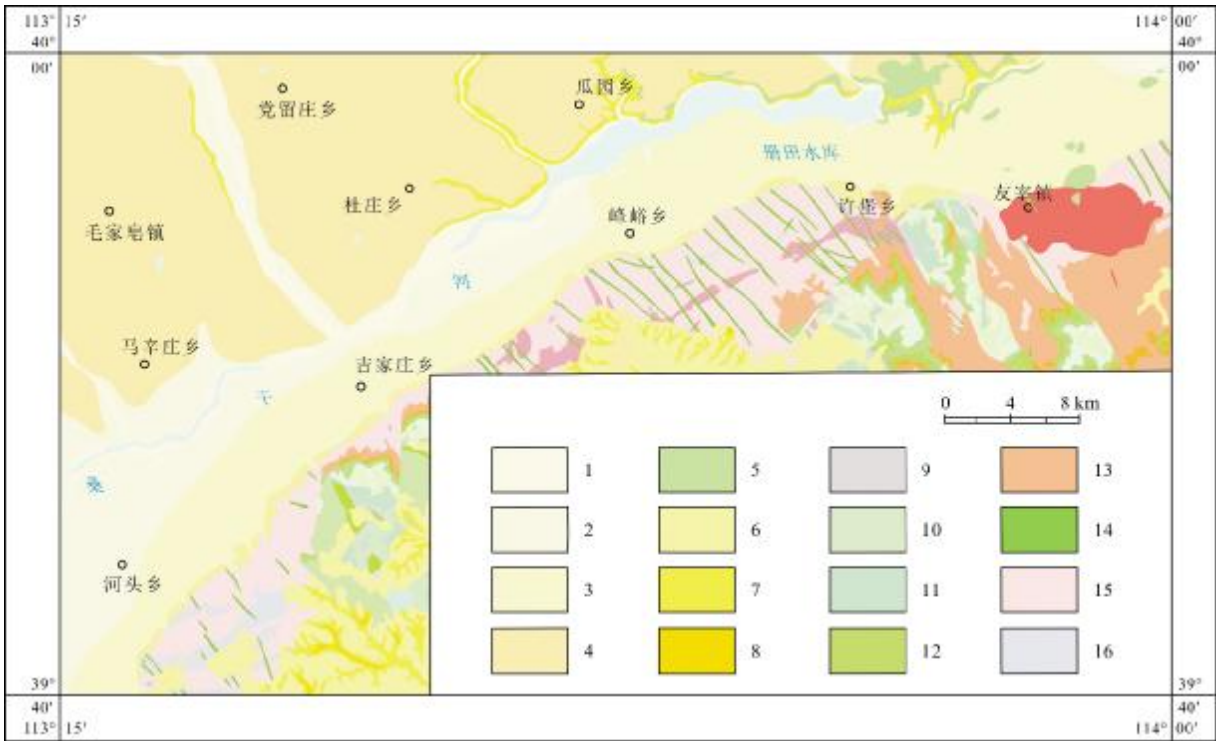


图 1 山西大同桑干河流域地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Sanggan River basin in Datong, Shanxi Province

1—沱阳组(Tuoyang fm.); 2—选仁组(Xuanren fm.); 3—方村组(Fangcun fm.); 4—峙峪组(Shiyu fm.); 5—册田玄武岩(Cetian basalt); 6—马兰组(Malan fm.); 7—泥河湾组(Nihewan fm.); 8—保德组(Baode fm.); 9—太原组(Taiyuan fm.); 10—马家沟组(Majiagou fm.); 11—三山子组(Sanshanzi fm.); 12—馒头组(Mantou fm.); 13—高于庄组(Gaoyuzhuang fm.); 14—辉绿岩脉(diabase dike); 15—土岭片麻岩(Tuling gneiss); 16—义兴寨片麻岩(Yixingzhai gneiss)

中太古界:土岭片麻岩,岩性主要为条带状黑云斜长片麻岩;义兴寨片麻岩,岩性主要为角闪斜长片麻岩。

2 材料和方法

2.1 样品采集与处理

对研究区进行表层土壤、深层土壤、基岩残坡积物质和岩石采样、化验及分析。土壤采用双层网格化方式取样,可采区土壤采样点密度为 1 件/2.5 km²,分别采集表层和深层土壤样品。表层样品采样深度为 0~20 cm,共取样 454 件;深层样品采样深度为 150~200 cm,共采集样品 448 件。同时在低山丘陵区系统采集了主要基岩样品共 55 件。采样点一般布设于耕地、园地、林地、草地及低山丘陵等地带,采样时避开新近搬运的堆积土、垃圾堆和局部污染明显区域。

2.2 样品测试分析

土壤和岩石样品分析由中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心实验室承担,测试过程严格按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/0258—2014)^[5]进行,采用 ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定土壤全锶,检出限为 2×10⁻⁶,元素实际检出限、准确度、精密度等质量指标达到或优于多目标区域地球化学调查规范的要求。所有样品报出率为 100%,准确度和精密度监控样品合格率 100%。

2.3 数据处理

统计前对所有数据进行异常值剔除,采用 Surfer、GeolPAS、MapGIS 等软件绘制工作区锶彩色等量线图,直观反映土壤中锶的空间分布,利于 SPSS 和 Excel 软件对数据进行相关性分析和分类参数统计。

3 土壤锶元素地球化学特征

土壤锶元素地球化学特征值见表 1、表 2。可以看出,调查区表层土壤锶元素含量平均值高于中国土壤 A 层背景值^[6]和太原市基准值^[7],是中国土壤 A 层的 1.60 倍。表层土壤锶元素变化为 108.7×10⁻⁶~413.9×10⁻⁶,平均值为 261.73×10⁻⁶,与湖北随州北部^[8]相当;深层土壤锶元素含量平均值同样高于中国土壤 C 层背景值^[6]和太原市背景值,其平均含量是中国土壤 C 层的 1.49 倍。深层土壤锶元素变化为 106.2×10⁻⁶~467×10⁻⁶,平均值为 279.19×10⁻⁶,略高于湖北随州北部区。

土壤锶元素空间分布特征见图 2。可以看出在空间分布上,表、深层土壤表现出高度的一致性,分布不均匀,且明显受水岩作用影响,高值区分布于桑干河及其支流两岸以及盆山结合区域。

3.1 不同酸碱性土壤中锶元素特征

不同酸碱性土壤锶元素地球化学特征值见表 3。表层土壤中锶元素平均含量表现为极强碱性土壤>强碱性土壤>碱性土壤,表明表层土壤中极强碱性土壤锶更为活跃。深层土壤锶元素平均含量表现为强碱性土壤>碱性土壤>极强碱性土壤,表明深层土壤中强碱性土壤更有利于锶的聚集。

3.2 不同地质单元土壤锶元素特征

不同成土母质土壤锶元素地球化学特征值(见表 4)表现为:表层土壤锶平均含量 248×10⁻⁶~278×10⁻⁶,泥河湾组中平均含量最高,马兰组中平均含量最低。不同地质单元锶平均含量依次为泥河湾组>峙峪组>方村组>沱阳组>选仁组>土岭片麻岩>册田玄武岩>马兰组。深层土壤锶平均含量 269×10⁻⁶~313×10⁻⁶,册田玄武

表 1 表层土壤锶元素地球化学特征值

Table 1 Geochemical eigenvalues of Sr in surface soil

平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值	中国土壤背景值(A 层)	湖北随州平均值	太原市 基准值
261.73	255.54	50.5	0.193	413.9	108.7	165.0	263.40	195

含量单位:10⁻⁶。

表 2 深层土壤锶元素地球化学特征值

Table 2 Geochemical eigenvalues of Sr in deep soil

平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值	中国土壤背景值(C 层)	湖北随州平均值	太原市背景值
279.19	268	61.1	0.219	467	106.2	170	252.74	202

含量单位:10⁻⁶。

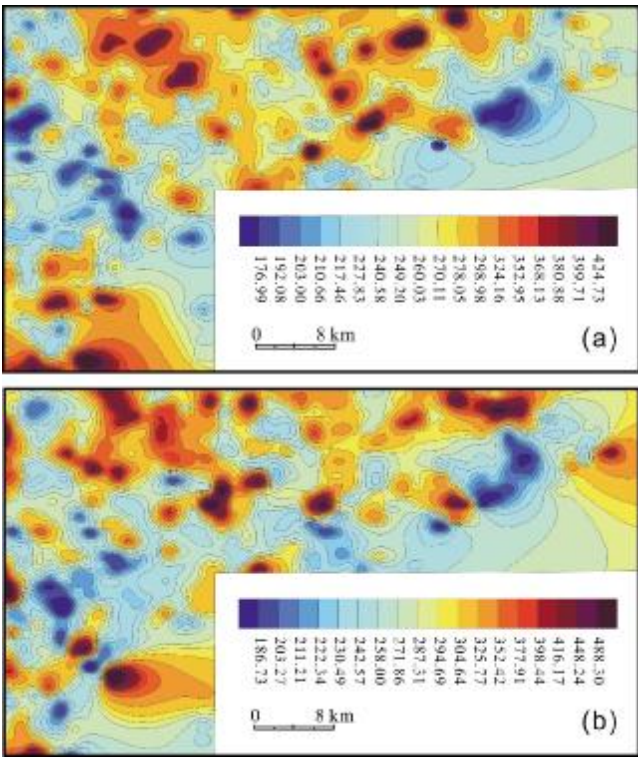


图 2 研究区土壤锶元素分布图

Fig. 2 Distribution maps of Sr in soil of the study area
a—表层土壤(surface soil); b—深层土壤(deep soil)

岩中平均含量最高, 马兰组中平均含量最低. 不同地质单元土壤锶平均含量依次为册田玄武岩>峙峪组>泥河湾组>方村组>沱阳组>选仁组>土岭片麻岩>马兰

组.

3.3 不同土壤类型锶元素特征

不同土壤类型土壤锶元素地球化学特征(见表 5). 表现为:表层土壤锶平均含量 $244\times10^{-6}\sim293\times10^{-6}$,盐碱土中平均含量最高,粗骨土中最低,不同土壤类型土壤锶平均含量依次为盐碱土>栗褐土>栗钙土>潮土>粗骨土. 深层土壤锶平均含量 $274\times10^{-6}\sim319\times10^{-6}$,盐碱土中平均含量最高,栗褐土中最低,不同土壤类型土壤锶平均含量依次为盐碱土>潮土>粗骨土>栗钙土>栗褐土.

3.4 不同土地利用锶元素特征

不同土地利用类型土壤锶元素地球化学特征(见表 6)表现为:表层土壤锶平均含量 $255\times10^{-6}\sim265\times10^{-6}$,含量依次为耕地>草地>园地>林地;深层土壤锶平均含量 $267\times10^{-6}\sim286\times10^{-6}$,含量依次为耕地>林地>草地>园地.

3.5 土壤锶元素与其他元素相关性分析

在一定的地球化学环境下,土壤元素表现出共同消长或此消彼长的关系,调查区土壤锶元素与其他元素指标相关系数见表 7. 通过相关性分析发现,调查区土壤锶元素与 Ba 的相关性最高,表、深层相关系数分别为 0.663 和 0.568,为强相关和中等程度相关. 除此之外,表层土壤锶与 B、Cr、La、Nb、Na 等相关性较高. 深层土壤锶与 As、B、Nb、Sb、Si 等相关性较高.

表 3 不同土壤锶元素地球化学特征值表

Table 3 Geochemical eigenvalues of Sr in soil of different acid-base properties

采样层位	土壤类型	样品数	平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值
表层	碱性	209	260.06	255.3	46.76	0.180	381	138.5
	强碱性	218	266.20	257.8	59.06	0.222	446.7	93.43
	极强碱性	13	297.11	250.4	144.40	0.486	682.3	155.7
	全区(剔除异常值)	434	261.73	255.55	50.46	0.193	413.9	108.7
深层	碱性	196	278.47	276.72	55.09	0.198	442.1	148.3
	强碱性	212	283.18	265.65	70.90	0.250	489.5	106.2
	极强碱性	23	283.71	272.3	66.68	0.235	452.3	165.9
	全区(剔除异常值)	427	279.19	268	61.11	0.219	467	106.2

含量单位: 10^{-6} .

表 4 不同地质单元土壤锶元素地球化学特征值表

Table 4 Geochemical eigenvalues of Sr in soil of different geological units

取样层位	地质单元	样品数	平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值
表层	沱阳组	45	255.79	246	65.20	0.255	438.4	93.43
	峙峪组	159	276.32	269.5	61.30	0.222	459.9	126.8
	册田玄武岩	10	248.09	252.05	38.16	0.154	298.51	187.5
	泥河湾组	12	277.36	274.3	32.20	0.116	332.71	237.06
	马兰组	32	241.03	233.6	32.17	0.133	322.9	167.6
	方村组	80	264.69	259.7	37.27	0.141	388.4	192.35
	土岭片麻岩	50	250.03	239.00	65.69	0.263	381	138.5
	选仁组	49	254.77	251	34.72	0.136	355.9	160.9
	全区(剔除异常值)	434	261.73	255.54	50.46	0.193	413.9	108.7
深层	沱阳组	43	271.99	266.4	73.84	0.272	494.9	106.2
	峙峪组	157	305.64	295.3	70.25	0.230	489.5	153.2
	册田玄武岩	9	309.72	261.8	102.09	0.330	515.17	206.6
	泥河湾组	12	280.98	287.65	58.33	0.208	399.25	178.97
	马兰组	31	245.25	237.2	39.86	0.163	352.7	171.7
	方村组	82	273.67	267.06	45.34	0.166	398.66	176.64
	土岭片麻岩	47	258.18	250.1	60.57	0.235	363.7	148.3
	选仁组	50	271.78	264.45	51.47	0.189	414.6	180.4
	全区(剔除异常值)	427	279.19	268	61.11	0.219	467	106.2

含量单位:10⁻⁶.

表 5 不同土壤类型锶元素地球化学特征值表

Table 5 Geochemical eigenvalues of Sr in different types of soil

采样层位	土壤类型	样品数	平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值
表层	栗褐土	200	262.30	258.76	39.51	0.151	394	140.5
	粗骨土	36	244.04	227.45	71.82	0.294	381	138.5
	潮土	41	247.05	237.7	58.06	0.235	397.4	93.4
	盐碱土	18	293.28	278.35	61.90	0.211	446.7	223.6
	栗钙土	134	260.56	258.85	46.04	0.177	382	126.8
	全区(剔除异常值)	434	261.73	255.54	50.46	0.193	413.9	108.7
深层	栗褐土	165	274.36	261.8	54.97	0.200	422.2	157.6
	粗骨土	32	290.38	258.25	101.34	0.349	588.9	148.3
	潮土	19	310.30	301.6	65.63	0.212	494.9	218.8
	盐碱土	11	319.22	303.1	48.41	0.152	410.5	240.7
	栗钙土	208	285.08	269.6	71.14	0.250	489.5	106.2
	全区(剔除异常值)	427	279.19	268	61.11	0.219	467	106.2

含量单位:10⁻⁶.

表 6 不同土地利用土壤锶元素地球化学特征值表
Table 6 Geochemical eigenvalues of Sr in soil of different land use types

采样层位	土地利用	样品数	平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值
表层	耕地	165	264.71	262.9	43.32	0.164	401.7	155.7
	园地	31	257.93	247.1	71.46	0.277	438.4	93.43
	林地	108	255.80	246.2	45.56	0.178	394	126.8
	草地	128	261.82	254.15	55.57	0.212	413.9	138.5
	全区(剔除异常值)	434	261.73	255.54	50.46	0.193	413.9	108.7
深层	耕地	163	286.22	283.9	65.10	0.228	476.3	106.2
	园地	20	266.96	267.79	33.75	0.126	322.4	209.3
	林地	98	279.17	263.6	57.82	0.207	422.2	157.6
	草地	149	277.15	261.71	66.98	0.242	485.1	148.3
	全区(剔除异常值)	427	279.19	268	61.11	0.219	467	106.2

含量单位:10⁻⁶.

表 7 土壤锶元素与其他元素相关系数
Table 7 Correlation coefficients between Sr and other elements in soil

元素	表层	深层	元素	表层	深层	元素	表层	深层	元素	表层	深层
Ag	0.303	0.194	Ga	0.330	0.203	S	0.128	0.056	Al ₂ O ₃	0.122	0.126
As	-0.330	-0.416	Ge	0.055	-0.065	Sb	-0.354	-0.421	CaO	0.077	0.332
B	-0.496	-0.490	Hg	-0.013	-0.064	Sc	0.347	0.188	TFe ₂ O ₃	-0.245	0.214
Ba	0.663	0.568	I	0.097	0.097	Se	-0.056	-0.145	K ₂ O	-0.059	-0.053
Be	-0.245	-0.351	La	0.467	0.307	Sn	-0.099	-0.127	MgO	0.317	0.256
Bi	-0.298	-0.277	Li	-0.218	-0.212	Th	0.001	-0.091	Na ₂ O	0.531	0.268
Br	0.125	0.083	Mn	0.011	0.048	Ti	0.245	0.214	SiO ₂	-0.273	-0.403
Cd	0.093	0.014	Mo	0.284	-0.017	Tl	-0.179	-0.281	C _{org}	-0.198	0.059
Ce	0.329	0.255	N	-0.236	-0.077	U	-0.007	-0.175	Tc	-0.080	0.189
Cl	0.142	0.148	Nb	-0.443	-0.439	V	0.317	0.311	Au	0.087	0.058
Co	0.320	0.248	Ni	0.385	0.262	W	-0.161	-0.258	pH	0.109	0.014
Cr	0.432	0.309	P	0.224	0.178	Y	-0.270	-0.359			
Cu	0.229	0.114	Pb	-0.147	-0.212	Zn	0.093	0.068			
F	0.295	0.301	Rb	-0.274	-0.341	Zr	-0.208	-0.277			

3.6 锶的物质来源

锶分布相当广泛,各类岩石中几乎均含有锶元素,特别是在含锶矿物的闪长岩、富钙花岗岩、黏土岩以及碳酸盐岩中,锶含量相对比较富集,是提供锶元素物质来源的主要母岩^[9-11]. 由于 Sr²⁺ 的离子半径与 Ca²⁺ 的离

子半径十分接近,从而 Sr 经常进入到各种富 Ca 的矿物中. 山西土壤母质中含有一定的富 Ca 矿物,从而 Sr 的含量随之增高^[12].

通过对研究区水样品的测试分析表明,桑干河水中锶含量普遍较高. 在册田水库附近锶含量最大值可

达 1.58 mg/L,平均值 1.09 mg/L,是饮用天然矿泉水标准^[13]的 5 倍以上。地下水在运移过程中不断与围岩发生各种化学反应,从而导致化学元素的迁移、聚散和分散,围岩中的锶是地下水锶元素的物质来源。盆地型平原区地下水中锶最富集,主要得益于地下水从补给区—径流区—排泄区构成一个完整的区域地下水流系统。地下水通过深部运移进行循环^[14-16],径流路径长,在含水层中滞留时间长,有利于锶的溶解和累积。锶在风化作用中为活动性阳离子,其水迁移系数 K_x 为 0.1~1,属迁移能力强的元素^[47]。在风化作用下,锶以重碳酸盐形式进入水溶液中,呈真溶液形式搬运,搬运过程中发生化学或生物化学反应生成沉淀,在水动力降低的位置再沉淀下来^[18]。

本研究系统采取了大同盆地周边岩石样品 55 件,对比大同火山群东区和西区 10 件样品测试结果^[49],发现前寒武纪变质岩和大同火山群西区岩石具有较高的锶含量。前寒武纪老变质岩内锶含量最高达 $1\,259\times 10^{-6}$,大同火山群西区锶含量最高达 913×10^{-6} (表 8)。大同火山群西区岩石锶含量均值为 776×10^{-6} ,整体水平高于大同火山群东区。研究区附近主要的富锶地层如下。

表 8 研究区主要岩石中锶元素含量统计表

Table 8 Contents of Sr in main rocks of the study area

地层单元	样品数	最小值	最大值	均值
前寒武纪老变质岩	19	117	1259	646
中生代碳酸盐岩	23	118	760	297
中生代碎屑岩	9	141	215	177
大同火山群西区	6	528	913	776
大同火山群东区	8	179	457	332

含量单位: 10^{-6} 。

蔡树庄片麻岩:岩性主要为黑云二长片麻岩,位于西咀村西山和聚乐堡乡西山。岩石中锶含量平均值 586×10^{-6} ,最大值 726×10^{-6} 。

于家窑片麻岩:岩性主要为条带状黑云二长片麻岩,位于集仁村-西营村北山。其岩性主要为肉红色、浅肉红色黑云二长片麻岩、黑云角闪二长片麻岩。中细粒花岗变晶结构,片麻状构造。浅色矿物以斜长石(25%~35%)、钾长石(25%~40%)、石英(10%~15%)为主,暗色矿物 15%~25%,以角闪石、黑云母为主。岩石

中锶含量平均值 452×10^{-6} ,最大值 625×10^{-6} 。

土岭片麻岩:岩性主要为条带状黑云二长片麻岩,位于云州区南部,桑干河南部山区。岩石中锶含量平均值 646×10^{-6} ,最大值 1259×10^{-6} ,可以认为它是位于桑干河南岸土壤中锶的主要来源。

大同火山群玄武岩:岩性主要为玄武岩、凝灰岩、火山碎屑锥,位于西坪镇西南部大同火山群地质公园。岩石中锶含量平均值 776×10^{-6} ,最大值 913×10^{-6} ,远大于土壤含量,可以认为它是桑干河北部土壤中锶的主要来源。

4 富锶土壤资源潜力评价

4.1 评价分级标准

目前对锶土壤资源评价分级没有全国统一标准,本研究中的评价根据全国 A 层土壤锶背景值 165×10^{-6} (中国土壤背景值,1990),结合山西省锶的分布特点,提出划分锶的标准(表 9)。

表 9 锶资源评价划分标准

Table 9 Classification criteria of Sr resource evaluation

指标	一级很丰	二级丰	三级适宜	四级较缺乏	五级缺乏
Sr	≥ 270	240~270	200~240	140~200	≤ 140

含量单位: 10^{-6} 。

根据本区表层土壤锶的地球化学分布特征,本评价将以区内表层土壤中锶含量大于或等于 240×10^{-6} 作为富锶标准进行评价。按照划分标准将区内富锶土壤划分为两大区:一级富锶区,锶平均含量大于 270×10^{-6} ;二级富锶区,锶平均含量在 $240\times 10^{-6}\sim 270\times 10^{-6}$ 。

4.2 富锶土壤资源分布特征

按照土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB15618—2018)^[20],对区内土壤中镉、汞、砷、铅、镉、铜、镍、锌和 pH 等 9 项指标进行了分析评价(表 10),pH 变化范围在 7.63~10.2 之间。对照农用地土壤污染风险筛选值(表 11),可以得出结论:区内土壤中镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌等污染物含量均小于其农用地土壤污染风险筛选值,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低,能满足无公害农产品种植业产地环境条件要求。

按照锶划分标准,结合区内农用地土壤污染风险评价结果,圈出富锶土壤($Sr\geq 240\times 10^{-6}$)面积 $1\,104\text{ km}^2$,

表 10 农用地主要污染元素含量统计表
Table 10 Contents of major polluting elements in agricultural land

元素	平均值	最大值	最小值
Cd	0.1	0.29	0.03
Hg	0.02	0.88	0.003
As	8.82	18.2	0.6
Pb	16.61	45.15	6.14
Cr	85.23	180.13	31.18
Cu	17.6	84.4	6.09
Ni	24.97	90.79	12.14
Zn	50.75	136.2	22.75

含量单位:10⁻⁶.

表 11 农用地土壤污染风险筛选值(基本项目)
Table 11 Soil pollution risk screening values of agricultural land (basic items)

污染物项目*		风险筛选值			
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Cd	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6
Hg	水田	0.5	0.5	0.6	1.0
	其他	1.3	1.8	2.4	3.4
As	水田	30	30	25	20
	其他	40	40	30	25
Pb	水田	80	100	140	240
	其他	70	90	120	170
Cr	水田	250	250	300	350
	其他	150	150	200	250
Cu	果园	150	150	200	200
	其他	50	50	100	100
Ni		60	70	100	190
Zn		200	200	250	300

* 重金属和类金属均按元素总量计;对于水旱轮作地,采用其中较严格的风险筛选值. 含量单位:10⁻⁶.

占调查区面积的 69.87%,其中,富锶农产品推荐种植产地 442 km². 富锶农产品推荐种植产地主要集中在桑干河及其支流两岸的耕地区.

4.3 富锶土壤资源潜力评价

根据区内富锶土壤分布特征和农用地土壤污染风险管控相关指标,结合土壤类型和水源条件,将区内富锶土壤划分为 3 类(图 3).

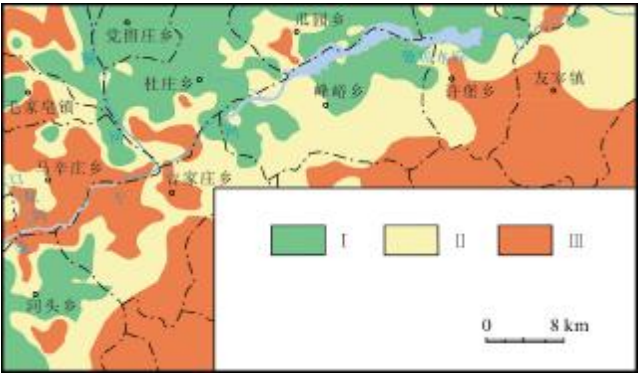


图 3 富锶土壤资源分布及开发建议图

Fig. 3 Distribution of Sr-rich soil resources and development suggestion

I—适宜开发区 (area suitable for development); II—具开发潜力区 (area with development potential); III—不具备开发潜力区 (area without development potential)

I 类区(适宜开发区):能满足无公害农产品种植业产地环境条件要求,且土壤中锶平均含量大于或等于 270×10⁻⁶ 的区域. 主要分布于党留庄乡、杜庄乡、瓜园乡、河头乡及峰峪乡北部,总面积 442 km². 具有较好的开发潜力,属于农业生产适宜开发的富锶土壤资源区.

II 类区(具开发潜力区):能满足无公害农产品种植业产地环境条件要求,且土壤中锶平均含量为 240×10⁻⁶~270×10⁻⁶,处于低山丘陵区、水源条件不好以及土壤盐碱化严重的区域,面积 662 km²,主要分布在盆山结合部和桑干河沿岸地下水位较浅的区域. 具有一定的开发潜力,但需要科学的有针对性的选择农产品,并对土地因地制宜地进行人工干预.

III 类区(不具备开发潜力区):土壤中锶的平均含量不足 240×10⁻⁶ 的区域,总面积 476 km²,主要分布于工作区东南山地带和西部毛家皂镇、马辛庄乡、吉家庄乡、许堡乡和友宰镇的南部区域,一般不具开发潜力,属不适宜富锶土壤开发的区域.

5 结论

(1)调查区表、深层土壤锶元素含量平均值均高于中国土壤 C 层背景值,表层平均含量是中国土壤 A 层

的1.57倍。深层平均含量是中国土壤C层的1.65倍。在空间分布上,表、深层土壤表现出高度的一致性,分布不均匀,且明显受水-岩作用控制,高值区分布于桑干河及其支流两岸。

(2)通过相关性分析,工作区表、深层土壤中锶与Ba、B、Cr、La、Nb、Na、As、Sb、Si等关系密切。

(3)不同地质单元中表、深层土壤锶含量平均值最高均为峙峪组,最低均为马兰组,说明土壤中锶的聚集过程与成土过程存在必然联系。不同土地利用类型中表、深层土壤锶含量平均值最高为耕地,这意味着区内富锶农产品开发具备较好的先天条件。

(4)桑干河以南山区前寒武纪老变质岩是区内最主要的岩石类型,其锶含量平均值高达 646×10^{-6} ,是区内表层土壤锶平均含量的2.47倍,是深层土壤锶平均含量的2.31倍,为土壤富锶提供了丰富的物质基础。

(5)调查区土壤锶元素含量高,存在大量的富锶土壤,且全区镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌等元素含量均小于农用地土壤污染风险筛选值,农产品质量安全、农作物生长和土壤生态环境风险低。全区富锶土壤($Sr \geq 240 \times 10^{-6}$)面积1 104 km²,占调查区面积的69.87%,其中适宜开发区面积442 km²,区内具有较好的开发富锶土壤资源潜力。

参考文献(References):

- [1] 黄祎雯, 傅远飞, 张保卫. 锶对骨代谢影响的研究进展[J]. 中国口腔种植学杂志, 2010, 15(3): 153-156.
Huang Y W, Fu Y F, Zhang B W. Research progress of strontium on bone metabolism[J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2010, 15(3): 153-156. (in Chinese)
- [2] 吴茂江. 锶与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2012, 29(5): 66-67.
Wu M J. The relationship between strontium and human health[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2012, 29(5): 66-67.
- [3] 苏文婷, 初晓辉, 谷大海, 等. 锶与骨质疏松症[J]. 微量元素与健康研究, 2011, 28(1): 63-65.
Su W T, Chu X H, Gu D H, et al. Strontium and osteoporosis[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2011, 28(1): 63-65.
- [4] 位秀丽, 张秀琴, 周毅德. 锶与人体健康关系[J]. 微量元素与健康研究, 2020, 37(5): 70-72.
Wei X L, Zhang X Q, Zhou Y D. Relationship between strontium and human health[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2020, 37(5): 70-72. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250 000)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [6] 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: 87-91.
China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 87-91. (in Chinese)
- [7] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
Cheng H X, Li K, Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [8] 胡江龙, 胡绍祥, 杨清富, 等. 湖北随州北部富锶土壤地球化学特征及资源潜力评价[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(3): 341-346, 367.
Hu J L, Hu S X, Yang Q F, et al. Geochemical characteristics and resource potential evaluation of strontium-rich soil in northern Suizhou, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(3): 341-346, 367.
- [9] 许佩瑶, 丁志农. 含锶饮用天然矿泉水的形成[J]. 勘察科学技术, 1997(5): 36-38.
Xu P Y, Ding Z N. Formation of potable natural mineral spring water containing strontium[J]. Site Investigation Science and Technology, 1997(5): 36-38.
- [10] 刘庆宣, 王贵玲, 张发旺. 矿泉水中微量元素锶富集的地球化学环境[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 19-23.
Liu Q X, Wang G L, Zhang F W. Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 19-23.
- [11] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 360-366.
Liu Y J, Cao L M, Li Z L. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984: 360-366. (in Chinese)
- [12] 史崇文. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, 9(2): 188-196.
Shi C W. Background values of soil elements in Shanxi and their distribution feature[J]. Jour Geol & Min Res North China, 1994, 9(2): 188-196.