doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23442

江西宜春袁州农用地富硒土壤分布及重金属环境容量研究

尹婷婷[1]，蔡海生[1]，张学玲[2]，何庆港[1]，刘　瑛[3*]

（1. 江西农业大学，江西省自然资源利用科技与管理创新研究基地 / 南昌市鄱阳湖生态重点实验室 / 富硒农业产业发展研究中心，江西　南昌　330045；2. 江西农业大学，国家林草局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室，江西　南昌　330045；3. 江西省宜春市农业农村局，江西　宜春　336099）

摘　要：江西省宜春市袁州区拥有丰富的土壤硒资源，但由于城镇化和工业化的迅速推进所导致的土壤重金属种类和数量的增多，以及土壤硒与重金属伴生关系的存在，使得富硒土壤一定程度上受到重金属威胁，限制了富硒农产品的开发利用。采集检测袁州区 162 份表层土壤样品中铅（Pb）、铬（Cr）、镉（Cd）、砷（As）、汞（Hg）、铜（Cu）、锌（Zn）、镍（Ni）8 种重金属的含量，通过土壤重金属环境容量估算以及运用环境容量指数法和空间插值法评价得到袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量水平及空间分布情况，据此分析袁州区农用地富硒土壤重金属污染状况。结果表明：（1）整个袁州区农用地可以划分为富硒、潜在富硒和足硒 3 种土壤，分别占袁州区农用地的 74.04%、16.00% 和 9.96%。（2）Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属在 8 个年限内的平均静态年容量和平均动态年容量大小排序相同，从大到小依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、As、Cu、Hg，7 种重金属的平均静态和动态年容量都随着控制年限的增长而减小，且 7 种重金属的平均动态年容量都比平均静态年容量大。（3）研究区富硒土壤中的 Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属都以中容量区为主，而 Cd 主要为超载区。综合来看，研究区 85% 以上为低容量区，整体容量较小，土壤受到中度污染，为提高研究区土壤重金属环境容量，降低污染程度，保证富硒农产品的安全，可针对不同容量区采取土壤污染防控和修复等措施。

关键词：富硒；重金属；环境容量；土壤修复；袁州区

硒是人体不可缺少的微量元素，具有抗氧化、抗癌、增强免疫力、解毒等作用。土壤中的硒通过食物链进入人体，是人体获取硒元素的重要来源[1-2]。重金属是土壤中主要的污染物，化学活动性强，易进入生物体系，进而威胁人类健康。研究表明，土壤中的硒与重金属之间存在一定的伴生关系，富硒土壤受到一定的重金属威胁[3-4]。近年来随着工农业的快速发展，尤其是工业废水的过量排放和化肥农药的过度使用，使得进入土壤的重金属的种类和数量在逐渐增多[5]。然而，土壤环境对重金属的容纳是有一定限度的，一旦超过这个限度，土壤将面临重金属污染，进而引发环境问题，威胁人类的健康[6]。因此，研究土壤环境对重金属容纳限度的问题，即研究土壤环境容量的问题，对土壤重金属污染的防控和修复具有重要意义。土壤环境容量是指一定的环境单元、一定时限内，遵循环境质量标准，既保证农产品的产量和生物学质量，同时也不使环境污染时，土壤所能容纳污染物的最大负荷量[7]。土壤环境容量有静态和动态之分，静态环境容量是土壤在标准值范围内具有一定的容量，没有考虑土壤系统的净化过程。然而，元素在土壤中实际上是处于一个动态的平衡过程，土壤会因重金属的输入与输出、固定与释放、累积与降解等净化过程而具有一定的净化容量，在静态环境容量的基础上将这一部分净化容量也考虑在内的量即为土壤动态环境容量[8]。当今，土壤重金属污染问题已成为约束社会可持续发展的重要因素，为了保护土壤资源，尤其是富硒土壤资源，有必要对受污染土壤实施土壤污染防治与修复措施。目前常用的土壤修复技术主要有物理、化学和生物修复技术[9]。

针对土壤环境容量的研究，研究对象多集中在

收稿日期：2023-07-22；**录用日期：**2023-10-14

基金项目：国家自然科学基金项目（31660140，31560150）；江西省高校人文社科重点研究基地项目（2018-32）；江西省自然资源厅项目（QY20220084，JXYJY2023004）。

作者简介：尹婷婷（1999-），硕士研究生，主要研究方向为土地资源管理。E-mail：2460296236@qq.com。

通讯作者：刘瑛，E-mail：983486548@qq.com。

农用地土壤[10]或农用地中的农田土壤[11]，对富硒土壤进行环境容量的研究相对较少。研究内容多集中在单项的环境容量估算或单项的环境容量评价，既进行环境容量估算又进行评价的研究较少，而对研究结果提出相应土壤污染防控与修复建议的更少。袁州区蕴含丰富的土壤硒资源，但由于土壤硒与重金属之间伴生关系的存在，使得袁州区富硒土壤存在一定的重金属污染的风险。刘珂等[12]在研究袁州区土壤硒与重金属含量空间关联中得出硒与 Cd、Hg、Cr 3 种重金属存在较强的空间相关性。杨晓帆等[13]基于内梅罗综合污染指数法得出袁州区富硒耕地土壤重金属综合污染等级分清洁、尚清洁和轻度污染 3 级，其中富硒耕地土壤环境质量以尚清洁为主，占比 60.87%。陈艺等[14]指出重金属 Cd 和 Hg 对袁州区土壤环境质量和农产品安全威胁较大。因此，对袁州区富硒土壤进行重金属环境容量研究，了解富硒土壤重金属的环境容量状况及土壤污染水平，对于袁州区富硒土壤的开发利用与污染防治具有重要意义。

基于以上分析，本研究以袁州区农用地为研究区域，估算农用地土壤重金属的静态和动态环境容量，采用综合指数法对环境容量进行评价，对评价结果进行克里金插值并与富硒分布图进行叠加，得到袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量的空间分布图，据此分析袁州区农用地富硒土壤的容量水平及污染程度，并提出相应的土壤重金属污染防控和修复建议。研究结果可为袁州区富硒土壤的开发利用以及土壤治理与修复提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况与样点采集

江西省宜春市袁州区（27° 33′~ 28° 05′ N，113° 54′ ~ 114° 37′ E）是蕴含丰富土壤硒资源的地区，辖 10 个街道、19 个镇、3 个乡。全区年均气温为 18.4℃，年均降水量为 1624.9 mm，属于中亚热带季风气候区。地貌以丘陵为主，地势南北高、中间低。区域以袁河贯穿其中，水资源丰富。土壤类型多样，有山地草甸土、山地黄棕壤、山地黄壤、山地红壤、石灰岩土、潮土、水稻土等，其中以山地红壤为主。根据 2017 年袁州区土地利用变更数据，袁州区土地资源丰富，土地总面积 253751 hm^2，其中农用地 223990.74 hm^2，约占袁州区土地总面积的 88.27%。袁州区农用地地理位置如图 1 所示。

1.2　数据收集与处理

本研究涉及矢量、栅格、采样点 3 类数据。（1）矢量数据：由袁州区自然资源局提供的行政区划数据和 2017 年袁州区土地利用变更数据，以及由江西省地质调查研究院提供的 2018 年袁州区富硒土地资源分布数据。（2）栅格数据：从地理空间

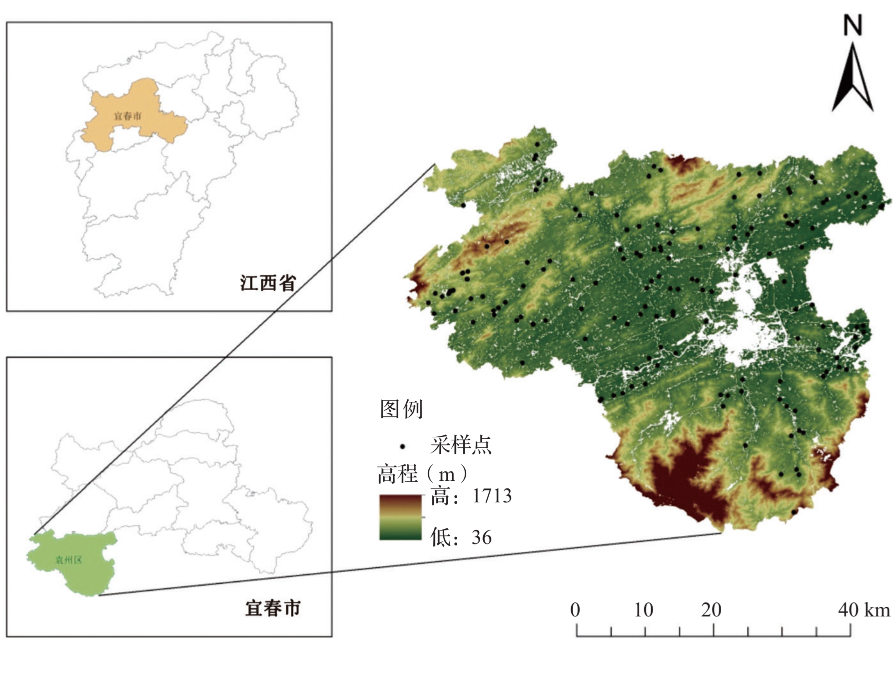

图 1　袁州区农用地地理位置及采样点分布图

数据云下载的 30 m 分辨率的数字高程模型数据。（3）采样点数据：本文采样点数据的采集与测定于 2019 年 5 月进行，课题组根据袁州区的地形地貌、土地利用方式等情况，布设在土壤易于汇集的区域，避开田埂、沟渠、林带、路边等无代表性区域，采用对角线布点法和梅花形布点法，利用 GPS 定位及野外实地勘察，在各类型农用地土壤中合理布设采样点，使用半圆槽取土器采集表层土壤（0 ~ 20 cm）样品 162 个（其中水田样品 54 个、旱地样品 40 个、园地样品 40 个、林地样品 28 个）。后经自然风干、研磨后过 2.0 mm 尼龙筛，将预处理好的样品统一加密送至江西省地质调查研究院进行 pH 值及 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Cu、Zn、Ni 8 种重金属元素含量的检测分析。其中 pH 值采用 pH 计测定，Cu、Zn、Ni 和 Cr 采取火焰原子吸收分光光度法测定，Pb 和 Cd 采取石墨炉原子吸收分光光度法测定，As 采取原子荧光法测定，Hg 采取冷原子吸收分光光度法测定。袁州区农用地采样点分布如图 1 所示。

1.3　研究方法

1.3.1　土壤重金属静态环境容量估算方法

土壤重金属静态环境容量是使用静止的观点表征土壤重金属相对于土壤环境质量标准的容纳量，计算公式如下[15-16]：

$$C_{ss}=10^{-6}M(C_{ic}-C_{ib}) \tag{1}$$

$$C_{sp}=10^{-6}M(C_{ic}-C_{ip}) \tag{2}$$

式中，C_{ss} 为土壤重金属 i 的静态环境容量（kg/hm^2）；C_{sp} 为土壤重金属 i 的现存环境容量（kg/hm^2）；M 为每公顷土壤耕作层重量，取值为 2.25×10^6 kg/hm^2；C_{ic} 为土壤重金属 i 的临界值（mg/kg）；C_{ib} 为土壤重金属 i 的背景值（mg/kg）；C_{ip} 为土壤重金属元素 i 的实测值（mg/kg）。

1.3.2　土壤重金属动态环境容量估算方法

土壤环境会因重金属的输入与输出、固定与释放、累积与降解等净化过程而处于一种动态平衡。前人在综合考虑土壤重金属这些动态的变化下，通过设定物质平衡线性模型，应用逐年递推方法得到土壤重金属平均动态年容量计算公式，计算公式如下[17-19]：

$$Q_{in}=10^{-6}M[C_{ic}-C_{ip}K^n]\frac{1-K}{K(1-K^n)} \tag{3}$$

式中，Q_{in} 为土壤重金属 i 的平均动态年环境容量（kg/hm^2）；M 为每公顷土壤耕作层重量，取值为 2.25×10^6 kg/hm^2；C_{ic} 为土壤重金属 i 的临界值（mg/kg）；C_{ip} 为土壤重金属元素 i 的实测值（mg/kg）；K 为污染物的残留率；n 为控制年限。

上式是在假设每年土壤重金属元素纳入量相等并且土壤中的重金属元素通过各种途径的迁出量近似正比于土壤重金属元素含量的情况下得出的。当规定了一定年限及临界值时应用此式就可以得到在一定年限后土壤中重金属含量达到临界值的条件下平均每年容许进入土壤的重金属量，即土壤重金属的平均动态年容量[20]。式中的 K 为残留率，表示经过一年耕作后，某重金属元素在土壤中的含量为上一年土壤中含量及当年输入量之和的比率。据研究，重金属在土壤中不易被自然淋溶，残留率一般在 90% 左右[21]。因缺乏袁州区土壤 K 值的相关试验数据，在计算中假定各种重金属在土壤中的残留率为 0.9。

1.3.3　土壤重金属环境容量评价方法

目前，国内研究多采用综合指数法对土壤环境容量进行评价。计算公式如下[6, 22-23]：

$$P_i=\frac{C_{sp}}{C_{ss}} \tag{4}$$

$$P_I=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_i \tag{5}$$

式中，P_i 为土壤重金属 i 的单项环境容量指数；C_{sp} 为土壤重金属 i 的现存环境容量（kg/hm^2）；C_{ss} 为土壤重金属 i 的静态环境容量（kg/hm^2）；P_I 为土壤重金属综合环境容量指数；n 为土壤重金属数量。

土壤重金属环境容量评价所遵循的标准如表 1 所示[6, 16]：

表 1　土壤重金属环境容量评价标准

容量等级	容量指数	容量水平
高容量区	P>1	容量很大，基本未受污染
中容量区	0.7<P ≤ 1	容量较大，受轻度污染
低容量区	0.3<P ≤ 0.7	容量较小，受中度污染
警戒区	0<P ≤ 0.3	容量很小，污染较严重
超载区	P ≤ 0	无容量，污染超过风险基准值

注：P 为单项环境容量指数 P_i 或综合环境容量指数 P_I。

2　结果与分析

2.1　袁州区农用地富硒土壤分布状况

本研究根据 2018 年江西省地质调查研究院提供的袁州区土壤硒分布数据，并参考蔡海生等[24]

论文中土壤富硒标准划分方法，将袁州区农用地划分为富硒（Se ≥ 0.4 mg/kg）、潜在富硒（0.4 mg/kg>Se ≥ 0.3 mg/kg）、足硒（0.3 mg/kg>Se ≥ 0.175 mg/kg）3 种土壤。划分结果如图 2 所示。

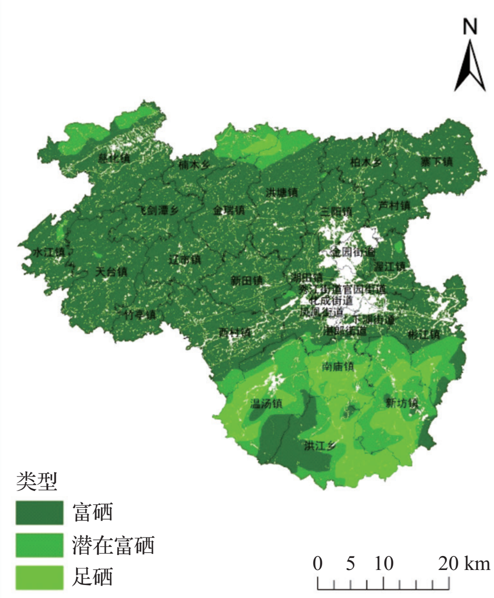

图 2　袁州区农用地富硒土壤分布示意图

由图 2 可知，袁州区农用地土壤硒资源丰富，其中，富硒土壤面积最大，面积为 167303.85 hm^2，占农用地的 70% 以上，主要呈片状集中分布在袁州区的中部和北部，在南部的温汤镇、洪江乡、新坊镇和彬江镇等地也有少量分布。潜在富硒土壤面积为 36146.20 hm^2，占农用地的 16%，大部分呈条带状分布在袁州区的南部，在北部的楠木乡、慈化镇以及中部的渥江镇、湖田镇、天台镇、水江镇和洪塘镇也有少量分布。足硒土壤面积为 22512.71 hm^2，仅占农用地的 9.96%，主要呈块状分布在袁州区的南部以及北部的楠木乡。

2.2　土壤重金属环境容量估算

2.2.1　土壤重金属背景值和临界值的确定

袁州区位于江西省宜春市，由于缺乏袁州区背景值的相关研究，在参考前人的研究成果下，采用何纪力等[25]在江西省土壤环境背景值研究中对宜春市土壤环境背景值的测定结果，此项研究在宜春市的采样土壤类型主要是红壤，袁州区主要的土壤类型也是红壤，采用此项研究中宜春市的背景值能较好地代表袁州区相应土壤重金属环境容量的背景值。如表 2 所示。

袁州区采样点 pH 平均值为 6.17，本研究计算袁州区农用地土壤重金属环境容量的临界值采用《农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618—2018）中的土壤污染风险筛选值（5.5<pH ≤ 6.5）。

根据采样点实测数据，Cd 的实测平均值超过了标准中的临界值，因此不计算重金属 Cd 的平均静态和动态环境容量。

表 2　土壤重金属背景值和临界值　（mg/kg）

种类	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Cu	Zn	Ni
背景值	33.6	54.85	0.08	10.08	0.09	22.14	57.88	22
临界值	90	150	0.3	40	1.8	50	200	70
实测平均值	43.34	76.99	0.43	13.91	0.16	29.84	88.03	27.43

2.2.2　土壤重金属静态容量的计算

根据表 2 中的背景值和临界值，运用公式（1）可得到研究区农用地土壤各重金属平均静态环境容量，再分别以 5、10、15、20、30、50、75、100 年为控制年限，得到研究区农用地土壤中 Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属近百年的平均静态年容量，结果如表 3 所示。

表 3　土壤重金属平均静态年容量　kg/（hm^2·年）

控制年限（年）	Pb	Cr	As	Hg	Cu	Zn	Ni
5	26.0550	45.9000	13.3200	0.7740	13.1400	58.9500	22.9500
10	13.0275	22.9500	6.6600	0.3870	6.5700	29.4750	11.4750
15	8.6850	15.3000	4.4400	0.2580	4.3800	19.6500	7.6500
20	6.5138	11.4750	3.3300	0.1935	3.2850	14.7375	5.7375
30	4.3425	7.6500	2.2200	0.1290	2.1900	9.8250	3.8250
50	2.6055	4.5900	1.3320	0.0774	1.3140	5.8950	2.2950
75	1.7370	3.0600	0.8880	0.0516	0.8760	3.9300	1.5300
100	1.3028	2.2950	0.6660	0.0387	0.6570	2.9475	1.1475

由表 3 可知，袁州区农用地土壤中 7 种重金属在 8 个年限内的平均静态年容量从大到小排序依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、As、Cu、Hg，且 7 种重金属的平均静态年容量都随着控制年限的增长而减小，减小的速率也随着控制年限的增长依次降低。

同样，根据表 2 中的背景值和临界值，运用公式（3）且分别以 5、10、15、20、30、50、75、100 年为控制年限，得到研究区农用地土壤中 Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属近百年的平均动态年容量。结果如表 4 所示。

表 4　土壤重金属平均动态年容量　［kg/（hm^2・年）］

控制年限（年）	Pb	Cr	As	Hg	Cu	Zn	Ni
5	39.3199	63.8194	19.4040	1.0422	19.7677	90.3639	32.8466
10	28.7446	47.2714	13.4914	0.6699	15.1982	64.9856	23.1976
15	25.5244	42.2324	11.6909	0.5565	13.8068	57.2578	20.2594
20	24.1144	40.0262	10.9026	0.5068	13.1976	53.8743	18.9730
30	23.0164	38.3080	10.2887	0.4682	12.7231	51.2392	17.9711
50	22.5604	37.5946	10.0338	0.4521	12.5261	50.1450	17.5551
75	22.5043	37.5068	10.0024	0.4502	12.5019	50.0104	17.5039
100	22.5003	37.5005	10.0002	0.4500	12.5001	50.0007	17.5003

由表 4 可知，8 个年限的平均动态年容量大小排序为5年 >10 年 >15 年 >20 年 >30 年 >50 年 >75 年 >100 年。研究结果说明，随着经济和工业化的持续推进，各种化肥和废水等污染物的不断涌入，土壤环境的自净能力及重金属的动态变化抵不上重金属的输入强度，使得土壤重金属动态环境容量在逐年下降。7 种重金属在 8 个年限内的平均动态年容量和平均静态年容量大小排序相同，从大到小依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、As、Cu、Hg。且 7 种重金属的平均动态年容量都随着控制年限的增长而减小，减小的速率也随着控制年限的增长依次降低。

综合表 3 和 4 可以看出，研究区 7 种重金属的平均动态年容量都比平均静态年容量大，说明土壤不仅在土壤临界值和背景值的范围内具有一定的容量，还因土壤重金属的输入与输出、固定与释放、累积与降解等过程而具有一定的净化容量。

2.3　土壤重金属环境容量评价

采用环境容量指数法进行土壤环境容量评价不仅能简明、清晰地反映区域土壤环境自净能力的大小，还能解析重金属在土壤环境中的富集情况，可以及时发现和解决土壤重金属污染等生态问题，保障生态环境的可持续发展，推动土壤的合理利用和开发，提高土壤资源的综合利用效益。利用公式（1）（2）（4）（5）计算得到研究区采样点 Pb、Cr、Cd、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 8 种重金属元素的单项环境容量指数和环境容量综合指数。对采样点 8 种重金属的单项环境容量指数和环境容量综合指数进行克里金插值，再根据表 1 中的分级标准对插值结果进行容量等级的划分，最后与农用地土壤富硒分布图进行叠加得到袁州区农用地富硒土壤环境容量指数的空间分布图，如图 3 所示。袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量等级面积占比如表 5 所示。

2.3.1　各重金属单项环境容量指数空间分布情况

由图 3 和表 5 可知，Pb 有 5 个容量等级，以中容量区居多，占农用地的 63.93%，近 50% 的面积存在富硒土壤中。高容量区主要分布在慈化镇、竹亭镇、寨下镇、柏木乡、芦村镇、三阳镇、湖田镇和洪塘镇，且绝大部分存在富硒土壤中，少量分布在潜在富硒土壤中。低容量区主要分布在研究区的北部和东南部的新坊镇以及中部的西村镇，近 2/3 的面积分布在富硒土壤中。警戒区面积最小，只在新坊镇和楠木乡有少量分布，且主要存在潜在富硒土壤中，在富硒土壤中分布最少。

Cr 只有中、低两个容量等级，且 85.93% 的面积为中容量区，14.07% 的面积为低容量区。中容量区中 69.56% 存在富硒土壤中，18.52% 存在潜在富硒土壤中，11.93% 存在足硒土壤中。低容量区呈两大片状分布在研究区的北部，其中 97.09% 存在富硒土壤中，2.91% 存在潜在富硒土壤中。

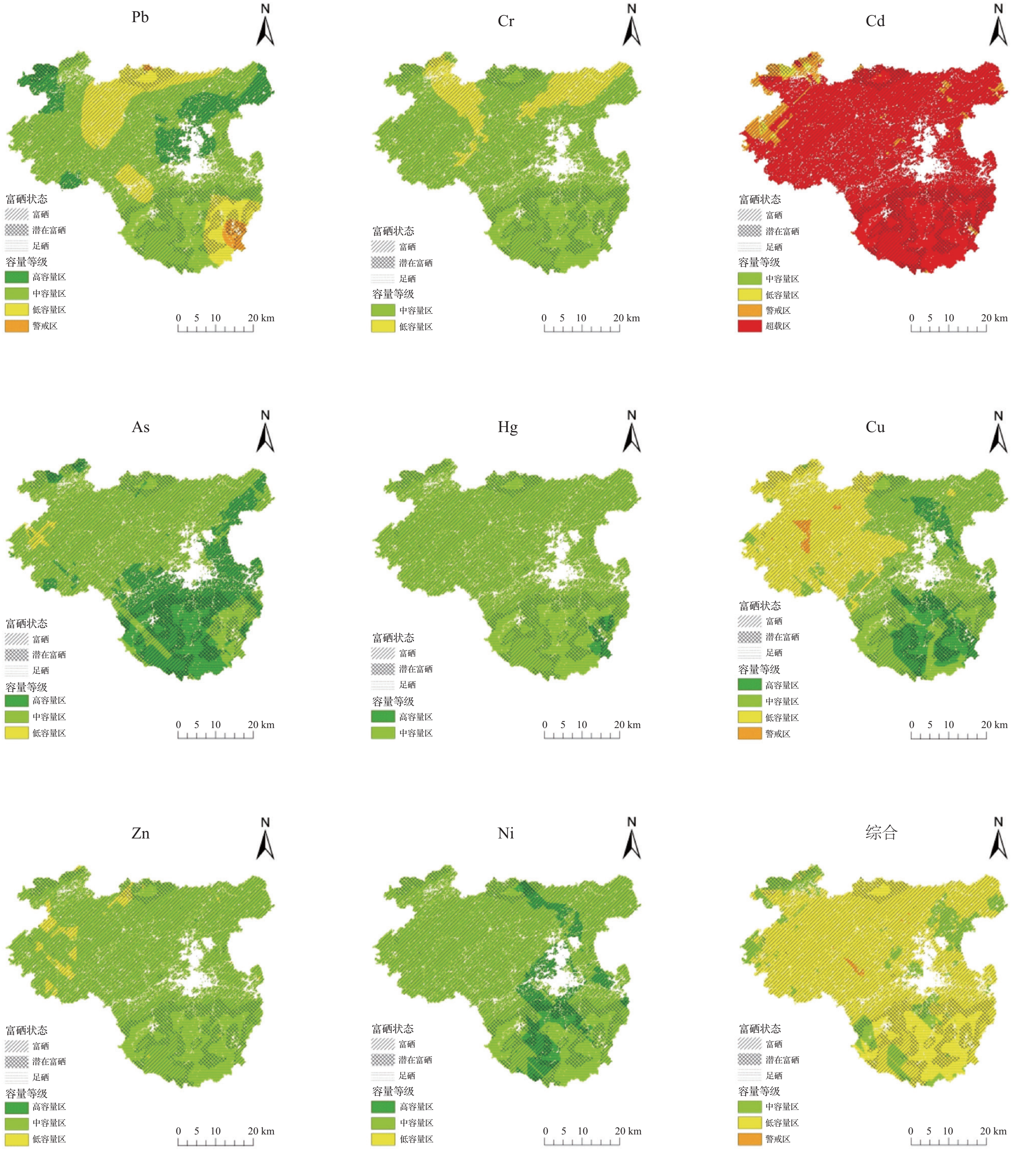

图 3　袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量指数空间分布示意图

表 5　袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量等级面积占比　（%）

容量指数	重金属	富硒状态	高容量区	中容量区	低容量区	警戒区	超载区
P_i	Pb	富硒	13.29	48.21	12.19	0.40	0.00
		潜在富硒	0.99	9.18	5.31	0.87	0.00
		足硒	0.00	6.54	3.24	0.47	0.00
	Cr	富硒	0.00	59.77	13.66	0.00	0.00
		潜在富硒	0.00	15.91	0.41	0.00	0.00
		足硒	0.00	10.25	0.00	0.00	0.00
	Cd	富硒	0.00	0.01	0.53	4.72	68.16
		潜在富硒	0.00	0.00	0.36	1.00	14.97
		足硒	0.00	0.00	0.00	0.04	10.21
	As	富硒	18.59	53.85	0.98	0.00	0.00
		潜在富硒	9.74	6.56	0.03	0.00	0.00
		足硒	7.04	3.21	0.00	0.00	0.00
	Hg	富硒	0.34	73.08	0.00	0.00	0.00
		潜在富硒	0.78	15.55	0.00	0.00	0.00
		足硒	0.63	9.62	0.00	0.00	0.00
	Cu	富硒	5.71	32.83	33.86	1.02	0.00
		潜在富硒	5.60	8.16	2.56	0.00	0.00
		足硒	4.23	5.98	0.04	0.00	0.00
	Zn	富硒	0.02	70.13	3.27	0.00	0.00
		潜在富硒	0.00	15.91	0.42	0.00	0.00
		足硒	0.00	10.25	0.00	0.00	0.00
	Ni	富硒	7.84	65.57	0.01	0.00	0.00
		潜在富硒	4.33	12.00	0.00	0.00	0.00
		足硒	1.96	8.29	0.00	0.00	0.00
P_I		富硒	0.00	10.04	63.71	0.33	0.00
		潜在富硒	0.00	2.67	13.62	0.00	0.00
		足硒	0.00	1.48	8.63	0.00	0.00

注：P_i 为单项环境容量指数，P_I 为综合环境容量指数。

Cd 有 4 个容量等级，绝大部分为超载区，占整个农用地的 93.34%，且在富硒土壤中最多，为 73.02%。警戒区和低容量区都主要分布在研究区西北部的慈化镇和水江镇，且都主要存在富硒土壤中，其余部分呈点状分布在研究区的中部、东北和东南部。中容量区呈点状分布在慈化镇、芦村镇和洪塘镇，面积仅占农用地的 0.01%，且只存在富硒土壤中。

As 有 3 个容量等级，面积最大的是中容量区，占整个农用地的 60% 以上，且其中 84.64% 的面积存在富硒土壤中。高容量区面积次之，占农用地的 35.37%，大部分呈片状分布在研究区的东南部，且 52.56% 的面积存在富硒土壤中。低容量区面积最小，仅占农用地的 1.01%，只存在富硒和潜在富硒土壤中，面积分别占低容量区的 97.03% 和 2.97%。且只在研究区西部的慈化镇、水江镇和天台镇有少量分布。

Hg 只有高、中两个容量等级，整个研究区绝大部分为中容量区，只有 1.75% 的面积为高容量区。高容量区只分布在研究区东南部的新坊镇和彬江镇，且在潜在富硒土壤中面积最多，占整个高容量区的 44.57%，其次为足硒状态，占整个高容量区的 36.00%，最小的是富硒土壤，只占高容量区的 19.43%。中容量区占农用地的 98.25%，分布广泛且集中，主要存在富硒土壤中，面积占整个中容量区的 74.38%。

Cu 有 4 个容量等级，面积较大的是中容量区和低容量区，分别占农用地的 46.97% 和 36.46%，且都主要存在富硒土壤中，二者毗邻分布，整体分布上呈现出中容量区在东、低容量区在西的分布形态。高容量区分布在研究区的东北和南部，在 3 种富硒土壤中所在比例较为相近，分别为富硒 36.74%，潜在富硒 36.94%，足硒 27.22%。研究区只有西部的天台镇、飞剑潭乡和楠木乡有小面积的警戒区，且只存在富硒土壤中，面积仅占农用地的 1.02%。

Zn 有 3 个容量等级，中容量区面积最大，分布最广，占整个农用地的 96.29%。低容量区呈块状分布在研究区的西部，其中 88.62% 的面积存在富硒土壤中，11.38% 的面积存在潜在富硒土壤中。高容量区呈点状零散分布在三阳镇、芦村镇和渥江镇，仅占农用地的 0.02%，且只存在富硒土壤中。

Ni 有 3 个容量等级，整个研究区整体呈现出高容量区贯穿南北，中容量区遍布东西的形态。高容量区占农用地的 14.13%，在富硒土壤中分布最多，占高容量区的 55.48%。中容量区面积最大，占农用地的 85% 以上，且大部分存在富硒土壤中，潜在富硒和足硒共有 23.63% 的中容量区面积。低容量区面积仅占农用地的 0.01%，且只存在富硒土壤中，呈点状零散分布在柏木乡。

综合来看，富硒土壤中的 Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属都以中容量区为主，而 Cd 的绝大部分为超载区。潜在富硒和足硒土壤中的 As 都以高容量区为主，Cd 都以超载区为主，Pb、Cr、Hg、Cu、Zn 和 Ni 6 种重金属都以中容量区为主。有高容量区的 Pb、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 6 种重金属的高容量区都主要分布在富硒土壤中，有中容量区的 8 种重金属的中容量区都主要分布在富硒土壤中，有低容量区的 Pb、Cr、Cd、As、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属的低容量区都主要分布在富硒土壤中，有警戒区的 Pb 的警戒区主要分布在潜在富硒土壤中，其余 Cd 和 Cu 的警戒区主要分布在富硒土壤中，有超载区的 Cd 重金属的超载区主要分布在富硒土壤中。

2.3.2　研究区综合环境容量指数空间分布情况

整个研究区有 3 个容量等级，以低容量区为主，整体容量较小，土壤受到中度污染。低容量区分布最广，面积最大，占研究区的 85% 以上，其中 74.12% 的面积存在富硒土壤中。中容量区在研究区的西北和中部以及南部都有分布，但主要分布在慈化镇、芦村镇、水江镇和南庙镇中，且大部分存在富硒土壤中。警戒区面积最小，仅占研究区的 0.33%，且只存在富硒土壤中，分布较为分散，在新田镇和辽市镇分布较多，在洪塘镇、三阳镇和柏木乡中分布较少。

3　讨论

江西省宜春市袁州区拥有丰富的土壤硒资源，具有发展富硒农业的天然土壤条件，但通过以上分析可知，研究区富硒土壤中 85% 以上为低容量区，整体容量较小，重金属污染较为严重，其中又以 Cd 污染最为突出，这不仅会对富硒农产品的安全造成威胁，还会在食物链的传递下对人体健康构成危害。为提高研究区土壤重金属环境容量，降低污染程度，可对不同容量等级采取土壤污染防控和土壤污染修复措施。对于研究区的中容量区应以土壤污染防控为主，加大土壤保护力度，致力于土壤提升改良，扩大中容量区面积，努力向高容量区迈进。对于低容量区和警戒区应以土壤污染修复为主，合理采用物理、化学、生物等修复技术因地制宜地修复土壤。如可以采用客土法向受污染的土壤中添加洁净的土壤，从而减少重金属与植物根系的接触面积、降低重金属的浓度[26]。也可以对污染土壤外加直流电场，通过电动修复技术去除土壤重金属[27]。再如可以采用化学淋洗技术将化学淋洗剂注入受污染土壤，使重金属发生溶解或迁移而随淋洗液流出[28]。姚振楠等[29]以乙二胺四乙酸二钠为淋洗剂对上海市某场地受 Cd、Pb、As 污染土壤进行淋洗修复，达到重金属去除率高、淋洗成本低的效果。还可以采用原位钝化修复技术，通过向受污染土壤添加钝化剂与重金属发生反应，从而降低重金属生物有效性和迁移性[30]。湖北省恩施土家族苗族自治州鹤峰县某富硒高镉区通过配比生物质炭 50%、海泡石 25% 和贝壳粉 25% 的钝化剂，经过钝化剂处理后，使水稻 Cd 含量降低了 69.16% ~ 83.29%[31]。也可调整种植结构或采用一定农艺调控措施，如施用功能性肥料，针对性的实现重金属的富集或规避性吸收[32]。为更加高效安全地修复土壤，还可以联合多种修复技术或创新发展新的修复技术。在进行土壤污染防控和修复时，重点要从污染源头抓起阻断重金属输入。加强对工业废水的处理和管控，确保废水达到排放和灌溉标

准，不对土壤造成污染。要加强农药、化肥的投入管理，做到成分安全、效果明显、频率适中、强度得当。在合理、高效开发利用富硒资源时也必须时刻关注土壤重金属的潜在危害性。通过建立富硒土壤防控政策，实施土壤重金属污染修复措施，提升土壤环境容量，使富硒土壤资源优势转化为经济优势，实现硒资源生态产品价值，带动袁州区经济发展，助力乡村振兴。

4　结论

进行江西省宜春市袁州区富硒土壤重金属环境容量研究，了解富硒土壤重金属的环境容量状况及土壤污染水平，对于袁州区富硒土壤的开发利用与污染防治具有重要意义。本研究通过估算袁州区农用地土壤重金属静态和动态环境容量，并采用环境容量指数法和空间插值法得到袁州区农用地富硒土壤重金属环境容量水平及空间分布情况，据此分析袁州区农用地富硒土壤重金属污染状况并提出相应的土壤污染防控和修复措施，主要结论如下：

（1）整个研究区农用地可以划分为富硒、潜在富硒和足硒 3 种土壤。富硒土壤面积最大，面积为 167303.85 hm^2，占农用地的 70% 以上；潜在富硒土壤面积为 36146.20 hm^2，占农用地的 16%；足硒土壤面积为 22512.71 hm^2，仅占农用地的 9.96%。

（2）Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属在 8 个年限内的平均静态年容量和平均动态年容量大小排序相同，从大到小依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、As、Cu、Hg，7 种重金属的平均静态和动态年容量都随着控制年限的增长而减小，且 7 种重金属的平均动态年容量都比平均静态年容量大。

（3）研究区农用地富硒土壤中的 Pb、Cr、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 7 种重金属都以中容量区为主，且都主要存在富硒状态中，而重金属 Cd 的绝大部分为超载区，已无容量。综合来看，研究区以低容量区为主，占研究区的 85% 以上，整体容量较小，土壤受到中度污染。研究区中容量区应以土壤污染防控为主，低容量区和警戒区应以土壤污染修复为主。

参考文献：

［1］　刘翘，刘永莉．硒元素的作用与富硒农产品开发［J］．农业与技术，2018，38（9）：29-30.

［2］　Tóth R，Juhászné K D，Csapó J．The role of selenium in nutrition and the manufacturing of selenium-enriched milk［J］．Acta Universitatis Sapientiae，Alimentaria，2022，15（1）：84-93.

［3］　高婕妤，周小娟，万翔，等．湖北省建始县土壤硒分布特征及影响因素分析［J］．华中农业大学学报，2023，42（1）：212-218.

［4］　Jiao L，Zhang L，Zhang Y，et al．Transcriptome analysis provides new insight into the distribution and transport of selenium and its associated metals in selenium-rich rice［J］．Environ Pollut，2022，301：118980.

［5］　冯莫沉，王海茳，赵迪斐．我国富硒土壤重金属污染现状及修复必要性分析［J］．能源技术与管理，2019，44（2）：12-14.

［6］　付传城，王文勇，潘剑君，等．南京市溧水区土壤重金属环境容量研究［J］．土壤通报，2014，45（3）：734-742.

［7］　夏增禄．土壤环境容量研究［M］．北京：气象出版社，1986.

［8］　夏增禄．中国土壤环境容量［M］．北京：地震出版社，1992.

［9］　李明圆，吕艳琼．土壤重金属污染修复技术的分析与应用［J］．当代化工研究，2023（9）：79-81.

［10］　安文超，王艳玲，汪进生，等．青岛市农用地土壤重金属背景值研究与土壤环境容量的计算［J］．广西大学学报（自然科学版），2022，47（6）：1662-1669.

［11］　安外尔·艾力，麦麦提吐尔逊·艾则孜，靳万贵，等．新疆焉耆盆地农田土壤重金属环境容量分析［J］．环境工程，2020，38（3）：168-173.

［12］　刘珂，蔡海生，张学玲，等．袁州区土壤硒与重金属含量空间关联及其影响因素分析［J］．西南农业学报，2023，36（7）：1492-1503.

［13］　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.

［14］　陈艺，蔡海生，曾君乔，等．袁州区表层土壤重金属污染特征及潜在生态风险来源的地理探测［J］．环境化学，2021，40（4）：1112-1126.

［15］　陈江，毕京博，吴杰，等．湖州土壤重金属污染趋势预测及环境容量评价［J］．地球与环境，2011，39（4）：531-535.

［16］　麦尔哈巴·图尔贡，麦麦提吐尔逊·艾则孜，阿依努尔·麦提努日，等．吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属环境容量评价与预测［J］．地球与环境，2020，48（5）：584-592.

［17］　叶嗣宗．土壤环境背景值在容量计算和环境质量评价中的应用［J］．中国环境监测，1993，9（3）：52-54.

［18］　马辉英，杨晓东，吕光辉．精河县重金属土壤环境容量及近百年趋势预测［J］．新疆农业科学，2016，53（8）：1521-1532.

［19］　范俊楠，田文娟，张钰，等．区域土壤背景重金属 Cd 环境容量分析与预测［J］．环境科学与技术，2022，45（S1）：241-246.

［20］　杜金辉，王菁，王学珍，等．崂山风景区土壤重金属元素环境容量的计算［J］．中国环境管理干部学院学报，2007，17

（1）：27-30.
［21］于光金，成杰民，王忠训，等. 山东省不同植被类型土壤重金属环境容量研究［J］. 土壤通报，2009，40（2）：366-368.
［22］王天一，邹辉，段碧辉，等. 湖北省潜江市农田土壤重金属环境容量评价及预警［J］. 资源环境与工程，2020，34（S1）：15-20.
［23］许芳，梁合诚，樊娟，等. 福州地区农业用地土壤重金属环境容量评价［J］. 安全与环境工程，2009，16（4）：6-8.
［24］蔡海生，陈艺，张学玲. 基于生态位理论的富硒土壤资源开发利用适宜性评价及分区方法［J］. 生态学报，2020，40（24）：9208-9219.
［25］何纪力，徐光炎，朱惠民，等. 江西省土壤环境背景值研究［J］. 北京：中国环境科学出版社，2006.
［26］赵鑫娜，杨忠芳，余涛. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展［J］. 中国地质，2023，50（1）：84-101.
［27］陈冠霖，胡剑兰，侯佳颖，等. 电动技术在重金属污染土壤修复中的研究及应用［J］. 能源与环境，2021（6）：58-60.
［28］Micle V，Damian G E，Rogozan G C，et al. Non-linear regression model for estimating the efficiency of heavy metals removal by soil washing with chitosan solution［J］. Appl Sci，2023，13：13010465.
［29］姚振楠，钮恺之，李明，等. 化学淋洗法修复土壤中 Cd、Pb、As 的工程研究［J］. 广东化工，2021，48（12）：154-156.
［30］曹锐，王悦，陈爽，等. 镉砷复合污染水稻土原位钝化修复技术研究进展［J］. 土壤学报，2023，60（3）：657-672.
［31］胡青，吴颖，张元培. 富硒土壤修复改良技术应用与思考——以湖北恩施州为例［J］. 中国土地，2022（1）：47-48.
［32］罗宝利，薛希仕，杨晓红. 电解锰渣库周边土壤重金属污染调查与防控策略探讨［J］. 广州化工，2022，50（13）：139-141.

Study on selenium-rich soil distribution and heavy metal environmental capacity of agricultural land in Yuanzhou district of Yichun city，Jiangxi province

YIN Ting-ting[1]，CAI Hai-sheng[1]，ZHANG Xue-ling[2]，HE Qing-gang[1]，LIU Ying[3*]（1. Jiangxi Agricultural University，Innovation Research Base of Natural Resources Utilization Technology and Management of Jiangxi Province / Key Laboratory of Poyang Lake Ecology of Nanchang / Development Research Center of Selenium-rich Agricultural Industry，Nanchang Jiangxi 330045；2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed，Jiangxi Agricultural University，Nanchang Jiangxi 330045；3. Agriculture Bureau of Yichun City，Yichun Jiangxi 336099）

Abstract：Yuanzhou district of Yichan city in Jiangxi province has abundant soil selenium resources，but due to the rapid advancement of urbanization and industrialization，the types and quantities of soil heavy metals have increased，and the existence of the associated relationship between soil selenium and heavy metals makes the selenium-rich soils threatened by certain heavy metals，which restricts the development and utilization of selenium-rich agricultural products. In this study，the contents of eight heavy metals，namely lead（Pb），chromium（Cr），cadmium（Cd），arsenic（As），mercury（Hg），copper（Cu），zinc（Zn）and nickel（Ni），were collected and detected in 162 surface soil samples in Yuanzhou district，and the environmental capacity level and spatial distribution of selenium-rich soil in agricultural land in Yuanzhou district were analyzed by estimating the environmental capacity of soil heavy metals and using the environmental capacity index method and spatial interpolation method，and the heavy metal pollution status of selenium-rich soil in agricultural land in Yuanzhou district was analyzed. The results showed that：（1）The entire agricultural land in Yuanzhou district could be divided into three kinds of soils：selenium-rich，potentially selenium-rich and selenium-sufficient，accounting for 74.04%，16.00% and 9.96% of the agricultural land in Yuanzhou district，respectively.（2）The average static annual capacity and average dynamic annual capacity of Pb，Cr，As，Hg，Cu，Zn and Ni in 8 years were sorted the same，in order of Zn >Cr >Pb >Ni >As >Cu >Hg，the average static and dynamic annual capacity of these seven heavy metals decreased with the increase of the control period，and the average dynamic annual capacity of the seven heavy metals was larger than the average static annual capacity.（3）The seven heavy metals of Pb，Cr，As，Hg，Cu，Zn and Ni in selenium-rich soil in the study area were mainly in the medium capacity area，while Cd was mainly in the overload area. On the whole，more than 85 % of the study area was belonged to low capacity area，and the overall capacity was low，and the soil was moderately polluted. In order to improve the environmental capacity of soil heavy metals in the study area，reduce the degree of pollution，and ensure the safety of selenium-rich agricultural products，different measures of soil pollution prevention and control and restoration could be taken for different capacity areas.

Key words：selenium rich；heavy metals；environmental capacity；soil remediation；Yuanzhou district