

云浮市油茶适生地区土壤重金属含量变异分析及污染评价^{*}

解懿妮¹ 叶龙华² 李小川¹ 丁晓纲¹
杨海燕¹ 张耕¹ 齐也¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 广东省林业科技推广总站, 广东 广州 510173)

摘要 对云浮市油茶 (*Camellia oleifera*) 适生地区采用随机布点、专题布点和林分布点相结合的方法进行布点, 采集土壤样品测定土壤重金属 Zn、Cu、Pb、Cd、Ni, 对 5 种重金属元素进行含量变异分析及污染评价, 结果显示: 5 种重金属元素的含量变异程度均大于 50%, 为中强度变异, 云浮市 5 个地点之间重金属有显著差异, 5 种元素的总体均值均小于广东省土壤环境背景值与土壤环境质量标准中的二级标准; 单因子污染指数评价显示元素 Cu 的污染程度最高, 云浮市总体内梅罗综合污染指数为 0.73, 处于污染等级中的 2 级, 污染水平为尚清洁, 而云浮市下属的郁南县、云城区和云安区的土壤综合污染等级为 3 级, 属于轻污染, 罗定市属于警戒线, 只有新兴县的污染程度为安全。因此, 需要对郁南县、云城区、云安区和罗定市的污染采用物理、化学、生物相结合的方法进行治理。

关键词 云浮市; 油茶适生地区; 重金属; 变异; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2017) 06-0084-07

Variation Analysis of Soil Heavy Metal Content and Its Pollution Evaluation in Yunfu City of Habitat Area of *Camellia oleifera*

XIE Yini¹ YE Longhua² LI Xiaochuan¹ DING Xiaogang¹
YANG Haiyan¹ ZHANG Geng¹ QI Ye¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Provincial Forestry Technology Extension Station, Guangzhou, Guangdong 510173, China)

Abstract Taking *Camellia oleifera* habitat area of Yunfu city as the research area, the method of distributing random spots, special spots and forest distribution points was adopted. The soil samples were collected to determine the contents of five heavy metal elements (Zn, Cu, Pb, Cd and Ni) and conduct a pollution assessment. The results showed that the variation of five heavy metal elements were more than 50%, which were medium intensity variation. There were significant differences of heavy metals among 5 locations in Yunfu city. The overall average of the five elements is less than the second level of the soil environmental background value and the soil environmental quality standard of Guangdong Province. The evaluation of single factor pollution index showed the highest degree pollution of Cu. The overall Nemerow pollution index of Yunfu city was 0.73, which was at level 2 of the pollution level, and the pollution level was still clean. Yunan county, Yuncheng district and Yun'an district, the subordinate of Yunfu city, has a comprehensive soil pollution level of 3 and belongs to the light pollution. Luoding city belongs to the warning line. Only the pollution in Xinxing county is safe. Therefore,

^{*} 基金项目: 广东省省级科技计划项目“油茶专用肥及配套技术研究”(2015A020208001), 广东省林业科技创新专项资金项目“森林土壤养分状况调查与评价”(2014KJ CX022)。

第一作者: 解懿妮 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林培育, E-mail: 854369214@qq.com。

通信作者: 李小川 (1962—), 男, 高级工程师 (教授级), 主要从事森林防火研究, E-mail: lixiaochuan@sinogaf.cn。

丁晓纲 (1978—), 男, 高级工程师 (教授级), 主要从事森林培育研究, E-mail: 27267152@qq.com。

it is necessary to control the pollution of Yunan county, Yuncheng district, Yun'an district and Luoding city by measures of the combination of physics, chemistry and biology.

Key words Yunfu city; *Camellia oleifera* habitat area; heavy metal; variation; pollution evaluation

土壤是陆地表面具有肥力、并能够生长植物的疏松表层^[1]。土壤作为生态系统的重要组成部分,可以为植物提供水分、养分等生长所需要的物质,为土壤微生物提供生存空间,在大自然中有着不可替代的地位,具有重大的生态意义^[2]。近年来,随着经济的快速发展,城市化、工业化水平的提高,工业废水、生活污水的排放及农药和化肥的不科学使用,使得许多污染物进入土壤,导致土壤中的金属元素含量超过土壤环境背景值,造成土壤重金属污染,影响植物体生长,甚至危害人体健康^[3-5]。

土壤重金属问题是国内外研究的热点^[6-8],目前对此方面的研究多集中在农田^[9-11]、耕地^[12-13]、矿区^[14-15]、城市地区^[16-17]及特殊区域^[18-19],对林地重金属的研究相对较少,尤其是对于油茶林地土壤重金属的研究更少,本文通过对于云浮市油茶(*Camellia oleifera*)适生地区的土壤重金属含量进行变异分析,并评价其污染状况,可以全面掌握云浮市油茶适生地区的林地状况,为提高林地生产力提供科学指导,对云浮市油茶种植具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云浮市位于广东省中西部,西江中游以南。地理位置在 22° 22' ~23° 19' N, 111° 03' ~112° 31' E 之间。云浮市辖云城区、云安区、新兴县、郁南县,代管罗定市,全市土地面积 7 785.11 km²。地处亚热带,年平均温度 22 °C,极端最低温度 0 °C,最高温度 39.1 °C,是全国年平均温差最小的大城市之一。云浮属亚热带季风气候,具有温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短等特征。年均降雨量为 1 982.7 mm,平均相对湿度为 68%。全年中,4 至 6 月为雨季,8 至 9 月天气炎热,多台风。

1.2 样点布设

选取适合油茶生长的地区,即坡度在 30° 以下,海拔 800 m 以下的酸性至微酸性土壤,云城

区、云安区地形大多为丘陵地带,坡度变化较小,采用随机布点的方法,样点数分别为 40、21 个;郁南县由于分布较多山地,矿产资源储量大,因此采用随机布点和专题布点相结合的方法,样点数为 22 个;罗定市和新兴县植物资源丰富,采用林分布点的方法进行布点,样点数分别为 209、60 个,总样点数为 352 个。

1.3 土壤样品采集及处理

土壤样品严格按照《森林土壤样品的采集与制备》(LY/T1210—1999)^[20]进行剖面土壤采集,采集前先记录各个样点的地名、地形、海拔、经纬度、坡向、坡度、主要植被类型,采集土样时,除去表面凋落物,挖取深 1 m 的土壤剖面,按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 由下而上分层采集土壤分析样品,再采用 S 形线路采集一份 0~10 cm 混合土壤,每个样地共 1 袋混合布袋样品、5 袋剖面布袋样品、10 个环刀样品和 10 个小铝盒样品,采集时间是 2015 年 11 月至 2016 年 1 月,共采集土壤样品 352 份。

1.4 样品分析

土壤重金属 Zn、Cu、Pb、Cd、Ni 采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消解后,采用火焰光度计法测定^[21]。

1.5 土壤重金属污染评价方法

采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法进行云浮市油茶适生地区土壤重金属污染评价^[22]。

1.5.1 单因子指数法 单因子指数法可以评价某种元素的污染程度,其计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为重金属 i 元素的污染指数; C_i 为重金属 i 元素的含量实测值; 本研究中 S_i 选用的是广东省土壤环境背景值^[23]。在广东省土壤环境背景值中,重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 的标准值分别为 0.056、36.000、17.000、47.300、14.400 mg/kg。单因子指数污染的分级标准是: $P_i \leq 1$ 时,污染水平为非污染; $1 < P_i \leq 2$ 时,为轻污染; $2 < P_i \leq 3$ 时,为中污染; $P_i > 3$ 时,为重污染。

1.5.2 内梅罗综合污染指数法 由于单因子指数

法只能反映出单个元素的污染水平，不能全面地显示出某个地区土壤的污染的整体水平，而内梅罗综合污染指数法可以兼顾单因子指数法中的平均值和最高值，突出污染水平高的元素对土壤环境的影响，因此，可以选用内梅罗综合污染指数法进行综合评价。其计算公式为：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\overline{P})^2 + P_{i\text{max}}^2}{2}}$$

式中： $P_{\text{综}}$ 是土壤的综合污染指数； $P_{i\text{max}}$ 为单因子指数法中污染程度最大的重金属污染指数值； $\overline{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 为单因子指数值的平均值，其计算公式为：

$$\overline{P} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i P_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中： w 为重金属元素的权重，Pb、Cu、Cd、Zn 和 Ni 的权重分别为 3、3、3、3、2。

内梅罗综合污染指数的分级标准见表 1。

1.6 数据分析

采用 Microsoft excel 2007 软件进行数据整理，采用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析及多重

比较^[24]，差异显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征

对云浮市油茶适生地区样点的土壤重金属含量进行描述性统计分析（表 2），可知云浮市油茶适生地区的五种元素的变异系数均大于 50%，变异程度较大，土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 元素含量的平均值分别为 0.022、17.185、14.465、25.659、10.877 mg/kg，变异范围分别为 0.003~0.169、2.717~103.314、1.776~56.595、5.362~102.326、1.115~55.921 mg/kg。

2.2 土壤重金属含量变异分析

对云浮市各地油茶适生地区的土壤重金属含量进行变异分析（图 1），并与广东省土壤环境背景值和《土壤环境质量标准》（GB15618-1995）中的二级标准^[25]进行比较，结果表明：5 个重金属元素在各地之间的含量有显著差异（ $P < 0.05$ ），元素 Cd 各地的含量大小排序为云城区>云安区>新兴县>郁南县>罗定市，云城区 Cd 元素含量是罗定市含量的 2.24 倍，云浮市各地 Cd 元素含量的平均值均未超过广东省土壤环境背景值和标准值。

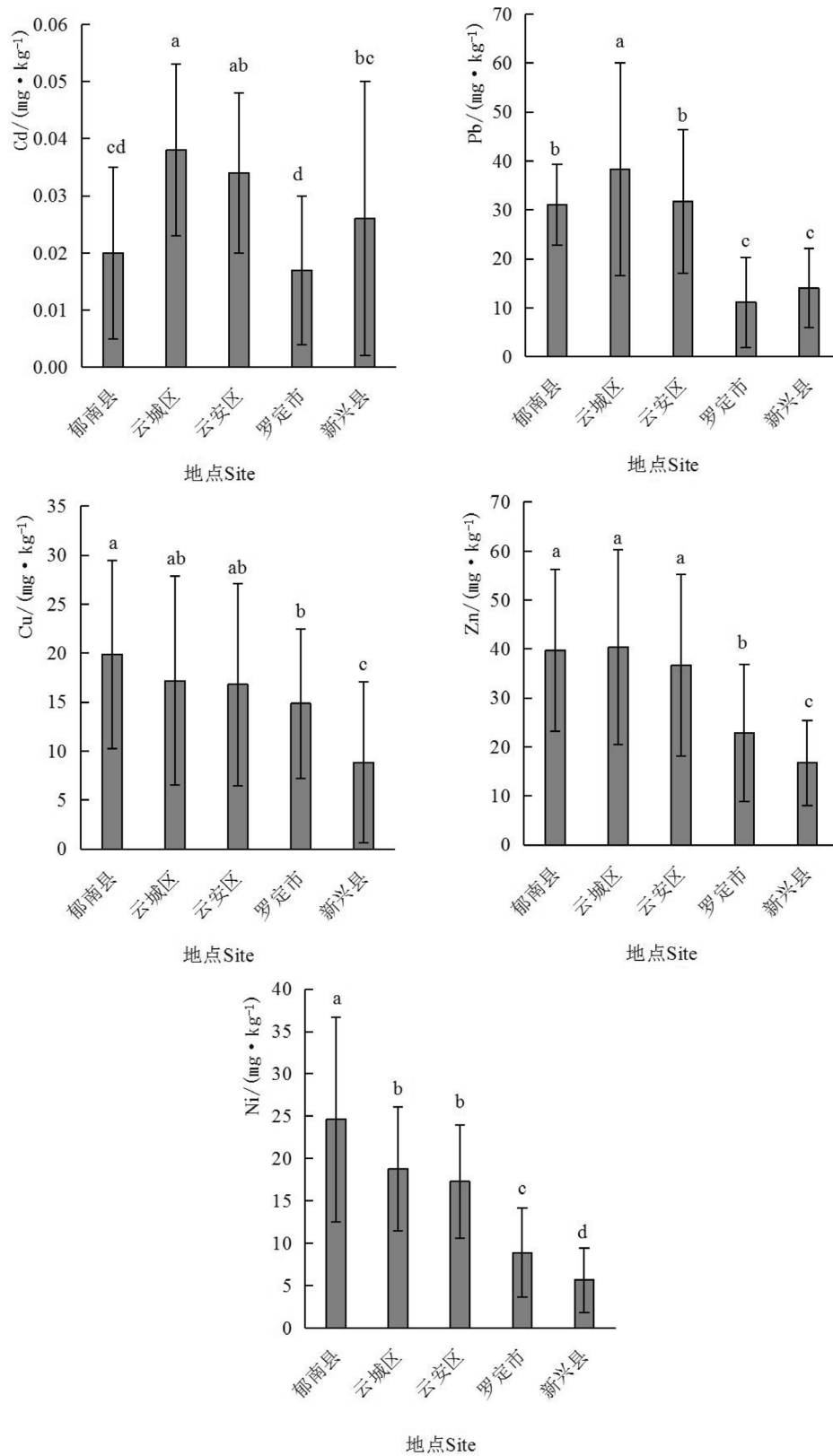
云城区元素 Pb 的含量最高，为 38.344 mg/kg，

表 1 土壤综合污染程度分级标准
Tab.1 Classification standards of soil comprehensive pollution grade

土壤综合污染等级 Grade of comprehensive soil pollution	土壤综合污染指数 Soil comprehensive pollution index	污染程度 The degree of pollution	污染水平 Pollution levels
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻污染	污染物超过起初污染值，作物开始污染
4	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中污染	土壤和作物污染明显
5	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染	土壤和作物污染严重

表 2 云浮市土壤重金属含量统计分析
Tab.2 Statistical analysis of soil heavy metals of Yunfu city

重金属 Heavy mental	均值 Average value/(mg · kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation/(mg · kg ⁻¹)	极小值 Minimum/(mg · kg ⁻¹)	极大值 Maximum/(mg · kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation/%
Cd	0.022	0.019	0.003	0.169	86.36
Pb	17.185	15.136	2.717	103.314	88.08
Cu	14.465	8.867	1.776	56.595	61.30
Zn	25.659	16.401	5.362	102.326	63.92
Ni	10.877	8.013	1.115	55.921	73.67



注：图中数据为平均值 $\pm$ 标准差，不同柱子上凡有相同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异不显著。Note: The data in the column chart is average $\pm$ standard deviation, the same lower case letters on different pillars indicate that there was no significant difference at $\alpha = 0.05$ level.

图1 云浮市各地区土壤重金属含量变异分析

Fig.1 Mutation analysis of soil heavy metal content in different areas of Yunfu city

其次是云安区、郁南县、新兴县，罗定市的 Pb 元素含量最低，为 11.139 mg/kg，只有云城区的 Pb 含量高于广东省土壤环境背景值，其余各地均比广东省土壤环境背景值低，与标准相比，云浮市所有地点的 Pb 元素含量平均值均低于标准值。

对于元素 Cu，各地的平均含量排序为郁南县（19.868 mg/kg）>云城区（17.166 mg/kg）>云安区（16.786 mg/kg）>罗定市（14.842 mg/kg）>新兴县（8.836 mg/kg），新兴县与其他各地的 Cu 含量之间均有显著差异（ $P < 0.05$ ），含量最高的郁南县是最低的新兴县含量的 2.25 倍，郁南县和云城区的元素 Cu 平均含量均大于广东省土壤环境背景值，云安区、罗定市和新兴县的平均含量均小于广东省土壤环境背景值，所有地区的 Cu 元素平均含量与标准相比，均低于标准值。

元素 Zn 平均含量最高的地区是云城区（40.410 mg/kg），其次是郁南县（39.715 mg/kg）、云安区（36.685 mg/kg）、罗定市（22.918 mg/kg），含量最低的地区是新兴县，为 16.803 mg/kg，郁南县、云城区和云安区之间的平均含量无显著差异，但与罗定市、新兴县的平均含量有显著差异（ $P < 0.05$ ），所有地区的元素 Zn 平均含量均小于广东省土壤环境背景值和标准值。

就元素 Ni 而言，各地平均含量排名分别是郁南县、云城区、云安区、罗定市、新兴县，与元素 Cu 含量排名一致，元素 Ni 平均含量最高的郁南县是云城区、云安区、罗定市、新兴县含量的 1.31 倍、1.42 倍、2.77 倍、4.37 倍，除云城区和云安区之间无显著差异外，其余各地平均含量之间均有显著差异（ $P < 0.05$ ），所有地区的元素 Ni 平均含量均小于标准值，与广东省土壤环境背景值相比，郁南县、云城区、云安区的平均含量均高于背景值，罗定市和新兴县的平均含量低于背景值。

2.3 云浮市土壤重金属污染评价

对云浮市油茶适生地区土壤重金属进行污染评价（表 3），结果表明：云浮市重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 的单因子指数值均小于 1.0，污染水平为非污染；单因子指数评价显示重金属 Cu 的污染水平最高，为 0.85，其次是元素 Ni（0.75）、Zn（0.54）、Pb（0.47），重金属 Cd 的污染水平最低，为 0.39；土壤综合污染指数为 0.73，处于污染等级 2，污染程度为警戒线，污染水平为尚清洁。

重金属 Cd 处于非污染水平的样点数占总样点数的 95.47%，处于污染水平的样点数占 4.53%，重金属 Pb 和 Zn 所有样点中处于重污染水平的样点数为 0 个，其余元素处于重污染水平的均占 0.28%，元素 Cd 样点中未被污染的样点比例最高，元素 Cu 中未被污染的样点比例最低，为 70.14%，处于轻污染水平的比例元素 Cu 最高，Cd 最低，处于中污染水平的样点比例中元素 Ni 最高，元素 Zn 最低，为 0.56%。

对云浮市各地油茶适生地区土壤重金属污染进行评价（表 4），结果显示：郁南县的单因子指数值除元素 Cu 和 Ni 大于 1 小于 2 属于轻污染外，其余元素均小于 1，属于非污染，郁南县中元素 Ni 的污染程度最高，土壤综合污染指数为 1.38，污染等级为 3 级，属于轻污染，表明污染物超过起初污染值，作物开始被污染。

云城区的元素 Pb、Cu、Ni 的单因子指数值均大于 1，属于轻污染，与郁南县一样，元素 Ni 的污染程度最高，Cd 的污染程度最低，云城区的土壤综合污染指数为 1.15，等级为 3 级，属于轻度污染。

云安区除元素 Ni 的单因子污染指数值大于 1 外，其余各元素的单因子指数值均小于 1，为非污染，元素 Ni 的单因子指数值最大，污染程度最高，云安区的土壤综合污染指数大于 1，污染等级

表 3 云浮市土壤重金属污染评价
Tab.3 Evaluation of soil heavy metal pollution in Yunfu city

重金属 Heavy metal	污染水平 Pollution levels				污染评价 Pollution evaluation	
	非污染 /%	轻污染 /%	中污染 /%	重污染 /%	P_i	$P_{综}$
Cd	95.47	3.68	0.57	0.28	0.39	0.73
Pb	89.77	8.24	1.99	0.00	0.47	
Cu	70.14	27.04	2.54	0.28	0.85	
Zn	91.27	8.17	0.56	0.00	0.54	
Ni	76.13	19.66	3.93	0.28	0.75	

表 4 云浮市各地土壤重金属污染评价
Tab.4 Evaluation of soil heavy metal pollution in different areas of Yunfu city

地点 Site	污染评价 Pollution evaluation	重金属元素 Heavy mental				
		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
郁南县	P_i	0.43	0.86	1.17	0.84	1.71
Yunan	$P_{\text{综}}$	1.38				
云城区	P_i	0.68	1.07	1.01	0.85	1.30
Yuncheng	$P_{\text{综}}$	1.15				
云安区	P_i	0.63	0.88	0.99	0.78	1.20
Yun'an	$P_{\text{综}}$	1.05				
罗定市	P_i	0.30	0.31	0.87	0.48	0.62
Luoding	$P_{\text{综}}$	0.71				
新兴县	P_i	0.46	0.39	0.52	0.36	0.39
Xinxing	$P_{\text{综}}$	0.48				

为 3 级，表明污染物超过起初污染值，作物开始被污染。

罗定市的 5 种元素的单因子污染指数值均小于 1，均属于非污染，其中元素 Cu 的污染程度最高，罗定市的土壤综合污染指数为 0.71，在 0.7 和 1.0 之间，污染等级为 2 级，程度为警戒线，污染水平为尚清洁。

新兴县与罗定市一样，5 种元素的单因子指数值均小于 1，属于非污染，Cu 的单因子指数值最大，土壤综合污染指数为 0.48，小于 0.7，综合污染等级为 1 级，程度为安全，污染水平为清洁。

3 结论与讨论

云浮市油茶适生地区的土壤重金属元素 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 含量各个样点之间的变异程度较大，变异系数均大于 50%，为中强度变异，5 种元素含量的总体均值均小于广东省土壤环境背景值和《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 中的二级标准，对于云浮市各地点来说，各个地点的 5 种元素平均值也均小于标准值，而与广东省相比，除云城区的元素 Pb 含量平均值大于背景值，郁南县和云城区的元素 Cu 含量均值大于背景值，郁南县、云城区和云安区的元素 Ni 含量均值比广东省土壤环境背景值高外，其余各地各元素的含量均值均小于广东省背景值。

云浮市油茶适生地区的单因子污染指数显示，5 种元素中 Cu 的污染程度最高，Cd 的污染程度最低，但 5 种重金属元素的单因子指数值均小于 1.0，为非污染水平。内梅罗土壤综合污染指数为

0.73，大于 0.7，处于污染等级中的 2 级，污染程度为警戒线，污染水平为尚清洁，表明云浮市油茶适生地区整体来说属于较清洁，可以因地制宜地种植不同品种的油茶。

而对云浮市各地油茶适生地区的污染评价显示：郁南县、云城区和云安区的土壤综合污染等级均为 3 级，属于轻污染，表明污染物超过起初污染值，作物开始受到污染，罗定市的土壤综合污染等级为 2 级，污染水平为尚清洁，只有新兴县的土壤综合污染指数小于 0.7，等级为 1 级，污染程度为安全，水平为清洁。因此，需要对郁南县、云城区和云安区的土壤污染进行重视，可以采取物理修复、化学修复、植物、动物及微生物修复等^[3,26-29]方法进行污染治理。虽然罗定市的污染水平为尚清洁，但也需要引起重视，减少人为活动引起的污染，防止土壤受到重金属的污染。

参考文献

[1] 邱孺, 康雅楠, 胡昆, 等. 浅谈土壤重金属污染现状及治理措施[J]. 内蒙古林业调查设计, 2017, 40(5): 1-3.
[2] 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 等. 城市土壤问题及其研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 925-933.
[3] 李广云, 曹永富, 赵书民, 等. 土壤重金属危害及修复措施[J]. 山东林业科技, 2011(6): 96-101.
[4] 周卫红, 张静静, 邹萌萌, 等. 土壤重金属有效态含量检测与监测现状、问题及展望[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 605-615.
[5] 蔡囊, 李吉跃, 李永杰. 土壤重金属污染下植物效应研究

- 进展[J]. 广东林业科技, 2009, 25(2): 71-77.
- [6] ROUDPOSHTI G, KARBASSI A, BAGHVAND A. A pollution index for agricultural soils[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 62(10): 1411-1424.
- [7] PAN Y, LI H. Investigating heavy metal pollution in mining brownfield and its policy implications: A case study of the Bayan Obo rare earth mine, Inner Mongolia, China[J]. Environmental Management, 2016, 57: 879-893.
- [8] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 几种区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1309-1316.
- [9] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
- [10] 张金莲, 丁疆峰, 卢桂宁, 等. 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2633-2640.
- [11] LI Y, GOU X, WANG G, et al. Heavy metal contamination and source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20 (5): 607-612.
- [12] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [13] 邱孟龙, 王琦, 刘黎明, 等. 优化赋权模糊综合评价法对耕地土壤重金属污染的风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 1049-1056.
- [14] 赵永红, 张静, 周丹, 等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染状况研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2477-2484.
- [15] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 270-279.
- [16] 林雯, 李吉跃, 栗娟. 广州市城市林地土壤重金属污染研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 25-29.
- [17] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 710-716.
- [18] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1-12.
- [19] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 253-259.
- [20] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤样品的采集与制备: LY/T1210—1999[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [22] 周广柱, 杨锋杰, 程建光, 等. 土壤环境质量综合评价方法探讨[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 113-115.
- [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.
- [24] 张力. SPSS 19.0在生物统计中的应用[M]. 3版. 厦门: 厦门大学出版社, 2014.
- [25] 国家环境保护总局. 土壤环境质量标准: GB15618—1995[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [26] SINGH B R, OSTE L. In situ immobilization of metals in contaminated or naturally metal-rich soils[J]. Environmental Reviews, 2001, 9(2): 81-97.
- [27] 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1990-1996.
- [28] 蔡信德, 仇荣亮, 陈桂珠, 等. 植物修复对重金属镍污染土壤微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 919-925.
- [29] 王新, 周启星. 重金属与土壤微生物的相互作用及污染土壤修复[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(11): 1-5.