

## 广西会仙湿地土壤重金属分布特征及风险评估

徐莉<sup>1,2</sup>, 黄亮亮<sup>1,2</sup>, 吴志强<sup>1,3</sup>, 黄健<sup>1,2</sup>, 高明慧<sup>1,2</sup>, 陈如霞<sup>1,2</sup>, 程剑<sup>4\*</sup>

(1. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协调创新中心, 广西桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 广西大学, 广西南宁 530004; 4. 上饶师范学校, 江西上饶 334000)

**摘要** [目的]调查广西会仙湿地土壤环境质量。[方法]研究广西会仙湿地表层土壤中 Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、As 和 Hg 7 种重金属元素在不同土地利用类型中的分布特征, 并进行风险评估。[结果]会仙湿地土壤 Zn、Pb、Ni、Cr、Cu、Hg 和 As 7 种重金属的平均含量分别为 (141.25 ± 126.62)、(46.99 ± 20.14)、(39.60 ± 13.93)、(110.71 ± 30.84)、(38.76 ± 27.51)、(0.18 ± 0.16)、(17.32 ± 6.92) mg/kg, 除 As 和 Hg 外, 其他重金属含量均超过广西土壤背景值; 重金属在不同土地利用类型中存在差异, 含量高的地方相对集中于池塘和沟渠, 其中河流湿地 Hg 含量超过国家土壤质量二级标准; Zn 与 Ni、Cr、Cu、As 呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 而 Pb 仅与 Cr 呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 而其他重金属元素间均未表现出相关性; 不同土地利用类型土壤存在不同程度的重金属污染, 河流湿地、林地、沼泽湿地属于中度污染, 其他湿地类型为轻度污染。[结论]会仙湿地土壤重金属污染已经对生态系统的健康发展构成了一定程度的威胁。

**关键词** 土壤; 重金属; 会仙湿地; 风险评估

中图分类号 S181.3; X53 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)29-0035-04

**Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Huixian Wetland of Guangxi Province**XU Li<sup>1,2</sup>, HUANG Liang-liang<sup>1,2</sup>, WU Zhi-qiang<sup>1,3</sup>, CHENG Jian<sup>4\*</sup> et al (1. Coordinated Innovation Center of Water Pollution Control and Water Security in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 3. Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004; 4. Shangrao Normal School, Shangrao, Jiangxi 334000)

**Abstract** [Objective] The aim was to survey the soil environmental quality of Huixian wetland of Guangxi. [Method] The contents, distribution characteristics and potential ecological risk of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, As, Hg) were investigated in different land use types (depth 0-20 cm) in Huixian Wetland of Guangxi Province. [Result] The average concentrations of Zn, Pb, Ni, Cu, Hg and As in soils were (141.25 ± 126.62), (46.99 ± 20.14), (39.60 ± 13.93), (110.71 ± 30.84), (38.76 ± 27.51), (0.18 ± 0.16) and (17.32 ± 6.92) mg/kg, respectively. The metals of Zn, Pb, Ni, Cr, Cu had high accumulation in soils by comparing to the background concentrations of soil elements in Guangxi Province. The contents of heavy metals varied in different land use types. For example, the woodland, pond, ditch in Huixian Wetland had relatively high content of metals; and the content of Hg in the river exceeded the second grade standard values of Chinese environmental quality standards for soils. Zn had significant positive correlation with the heavy metals Ni, Cr, Cu, As ( $P < 0.01$ ), while the metal of Pb showed extremely significant correlation with Cr ( $P < 0.01$ ), but had no significant relationship with other heavy metals. The soils with different land use types were polluted by heavy metals, and soil from the river wetland, woodland and marsh were moderately polluted, the others were slightly polluted. [Conclusion] The healthy development of ecosystem has been threatened by soil heavy metal pollution in Huixian.

**Key words** Soil; Heavy metal; Huixian wetland; Risk assessment

湿地是一个多功能的生态系统, 在维持珍稀物种、阻止和延缓洪水、调节气候、净化水质、提供旅游资源等方面发挥重要作用<sup>[1-2]</sup>。广西会仙湿地是典型的岩溶湿地, 由睦洞湖、分水塘与古柳运河等湿地构成, 形成了以“湖泊-沼泽-库塘-河流-人工运河”为主的复合湿地生态系统<sup>[3]</sup>。随着经济社会的快速发展和人们生活水平的不断提高, 工农业废水和生活污水的排放量逐年增加, 湿地受重金属污染越来越严重<sup>[4]</sup>。

土壤中的重金属通过食物链的富集对生物体及生态系统产生较大危害, 是严重危害土壤生态安全的污染物之一<sup>[5]</sup>。近年来, 随着人们对土壤质量的关注, 全国很多地方均开展了土壤重金属调查和评价等相关研究<sup>[6]</sup>, 2014 年全国土壤污染状况调查公报显示, 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 其中, 耕地、林地、草地土壤点位超标率分别为

19.4%、10.0%、10.4%<sup>[7]</sup>。笔者以会仙湿地作为研究区域, 研究其土壤重金属含量及分布特征, 运用单因子指数法和综合污染指数法评价湿地土壤重金属的污染程度, 以期作为广西会仙湿地生态环境保护和资源合理利用提供理论依据。

**1 研究区概况**

桂林会仙湿地位于桂林市临桂区会仙镇、四塘乡和雁山区东部一带<sup>[8]</sup>, 以睦洞、四益、新民、山尾、文泉等村为主, 地势平坦, 是典型岩溶峰林平原地貌 (110°10' ~ 110°14'E, 25°5' ~ 25°6'N)。该地域内拥有睦洞湖、相思江以及唐代开凿的桂柳运河, 气候为中亚热带湿润季风气候, 雨量充沛, 山青水秀, 气候宜人, 生态区位重要, 被誉为“桂林之肾”。年均降雨量 1 863.2 mm, 年均日照时数 1 588.5 h, 平均气温 19.2 °C, 以北风和东北风为主<sup>[9]</sup>, 区内植被以沉水植物居多, 土壤类型以丘陵红壤、黄红壤和棕色石灰土为主。由于长期以来开荒造田、围湖造塘、挤占河道等行为, 使会仙湿地的湿地面积减少, 土壤结构改变, 湿地功能退化, 为保护会仙湿地, 2012 年获批国家湿地公园。

**2 材料与方法****2.1 样品采集与处理** 选取会仙湿地 10 种具有代表性的

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (51509042); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFB118072); 广西教育厅高校科学研究项目 (YB2014151); 博士科研启动基金项目; 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目; 广西自然科学基金项目 (2016GXNF003A380104)。

**作者简介** 徐莉 (1992-), 女, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向: 环境生态学。\* 通讯作者, 讲师, 从事环境生物学研究。

**收稿日期** 2016-08-24

土地利用类型土壤(图1),分别为河流湿地、沼泽湿地、湖泊湿地、玉米地、水田、油菜地、林地、菜地、沟渠、池塘,共计62份土壤样本。采样点均采取多点采样混合法,用塑料勺取

土壤表层(0~20 cm)泥样于聚乙烯自封袋中,标记好带回实验室。所采样品自然风干、除杂、混合均匀,经研磨筛分过100目尼龙筛后,分装于聚乙烯自封袋中,干燥保存<sup>[10]</sup>。

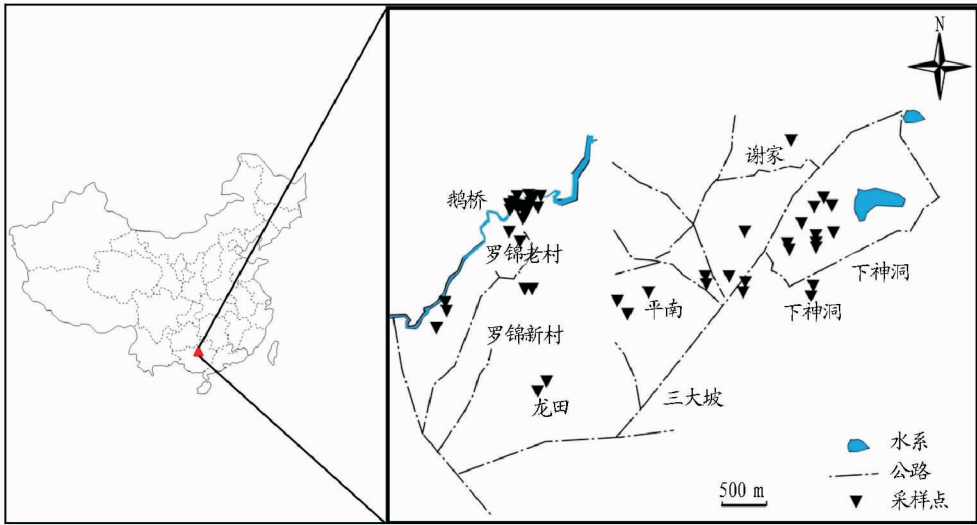


图1 研究区位置及采样点布置示意

Fig.1 Layout diagram of the studied area site and sampling site

**2.2 样品分析** 样品经  $H_2O_2 - HNO_3 - HF - HCl$  混合体系消煮,消解程序见表1,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分别测定土壤重金属 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb 含量<sup>[11]</sup>。样品经(1+1)王水( $V_{HCl}: V_{HNO_3} = 3:1$ )沸水浴消解后,稀释定容,采用原子荧光形态分析仪测定土壤重金属 As 和 Hg 含量<sup>[12]</sup>。为保证分析的准确性,每批样品各有3个空白样品和标准物质与样品同步分析。采用的标准物质为 GSS-4 (GBW07404)。仪器测定结果表明,测定值在标准值的15%误差范围内。

表1 会仙湿地表层土壤微波消解程序

Table 1 Microwave digestion in the surface soil of Huixian wetland

程序 Stage	功率 Power W	爬升时间 Climbing time//min	温度 Temperature ℃	保持时间 Hold time min
1	1 600	3	120	3
2	1 600	6	150	3
3	1 600	6	170	20

**2.3 污染评价法** 采用单因子指数法和内梅罗综合指数法进行综合评价,评价标准依据广西土壤背景值<sup>[13]</sup>;污染等级

划分参照表2。

**2.3.1 单因子指数法。**对土壤中某一污染物的污染程度进行评价,是目前环境各要素评价中应用较广泛的一种指数。表达式:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, $P_i$ 为土壤中污染物*i*的环境质量指数; $C_i$ 为污染物*i*的实测浓度(mg/kg); $S_i$ 为污染物的评价标准。

**2.3.2 内梅罗综合污染指数。**该方法突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影 响,反映各种污染物对土壤环境的作用<sup>[14]</sup>。表达式:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{ave}})^2 + (P_{\text{imax}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为土壤综合污染指数; $P_{\text{ave}}$ 为土壤中各污染物的指数平均值; $P_{\text{imax}}$ 为土壤中单项污染物的最大污染指数。

**2.4 数据处理** 采用 SPSS 18.0、Excel 2007 和 Mapinfo Professional 11.0 进行数据处理、分析和绘图,重金属采用 Spearman 进行相关性分析。

表2 土壤重金属污染分级标准

Table 2 Criteria for classification of soil heavy metal pollution

等级划分 Grade	单项污染指数 Single pollution index	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution grade	污染水平 Pollution level
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染	土壤受到中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重度污染	土壤受污染已相当严重

### 3 结果与分析

**3.1 表层土壤重金属含量** 由表3可知,会仙湿地土壤重

金属含量最高的是 Zn,最低的是 Hg,其含量由高到低依次为 Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、As、Hg。与广西土壤背景值相比,会仙湿地

土壤中的 Zn、Pb、Ni、Cr、Cu 平均含量均超过当地背景值。其中,重金属 Zn、Pb、Ni、Cr、Cu 平均含量分别超过背景值 1.87 倍、1.96 倍、1.49 倍、1.35 倍、1.39 倍。

表 3 会仙湿地土壤重金属含量

Table 3 Heavy metal contents in the soils of Huixian Wetland

重金属 Heavy metal	含量 Content	背景值 Background value
Zn	141.25 ± 126.62	75.60
Pb	46.99 ± 20.14	24.00
Ni	39.60 ± 13.93	26.60
Cr	110.71 ± 30.84	82.10
Cu	38.76 ± 27.51	27.80
Hg	0.18 ± 0.16	0.20
As	17.32 ± 6.92	20.50

**3.2 不同土地利用类型表层土壤重金属含量** 由表 4 可知,不同土地利用类型土壤重金属含量存在差异,沟渠 Zn 含量最高,其他土地利用类型土壤 Zn 含量由高到低依次为池塘、林地、河流湿地、菜地、玉米地、沼泽湿地、油菜地、湖泊湿地、水田,沟渠 Zn 含量显著高于水田和油菜地;林地 Pb 含量最高为(70.47 ± 12.51)mg/kg,其他土地利用类型土壤 Pb 含量由高到低依次为沼泽湿地、河流湿地、水田、沟渠、湖泊湿地、玉米地、菜地、池塘、油菜地;土壤 Ni 含量从高到低依次为河流湿地、沼泽湿地、林地、玉米地、菜地、池塘、油菜地、湖

泊湿地、水田、沟渠,不同土地利用类型 Ni 含量差异不显著;玉米地和林地 Cr 含量相对较高,分别为(126.77 ± 18.27)、(124.53 ± 24.69)mg/kg,其他土地利用类型土壤 Cr 含量由高到低依次为池塘、油菜地、湖泊湿地、河流湿地、水田、沼泽湿地、菜地、沟渠,除菜地外,其他土地利用类型土壤 Cr 含量均显著高于沟渠;不同土地利用类型土壤 Cu 含量由高到低依次为池塘、菜地、沟渠、沼泽湿地、河流湿地、油菜地、玉米地、水田、湖泊湿地、林地;菜地和河流湿地土壤 As 含量相对较高,分别为(20.60 ± 12.66)、(20.09 ± 1.61)mg/kg,湖泊湿地、水田和林地 As 含量相对较低;河流湿地 Hg 含量极显著高于其他土地利用类型。

根据国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995),除河流湿地 Hg 含量超过国家二级标准外,其他土地利用类型不同重金属含量均接近或低于国家土壤质量二级标准。会仙湿地河流湿地 Hg 污染严重。Zn、Cu 的空间分布较一致,含量较高的样点主要集中在池塘和沟渠,含量较低的点为水田。菜地、池塘地处养殖场附近,动物饲料中 Cu 通过动物粪便在土壤中富集,杀虫剂的使用以及周边工厂污水的排放、垃圾焚烧等均导致其 Zn、Cu 含量较高<sup>[15]</sup>。Pb 作为交通污染源的标识要素之一,土壤重金属含量与公路附近的交通流量有一定的关系<sup>[16]</sup>。不同土地利用类型土壤 As 和 Ni 含量变化特征反映它们很可能受到同一因素影响<sup>[17]</sup>。

表 4 会仙湿地不同土地利用类型土壤重金属含量

Table 4 The heavy metals contents in the soil of Huixian Wetland under different land use types

土地利用类型 Land use types	Zn	Pb	Ni	Cr	Cu	As	Hg
河流湿地 River wetland	124.50 ± 24.61	55.30 ± 0.85	48.85 ± 1.48	104.95 ± 5.16	35.45 ± 6.72	20.09 ± 1.61	0.52 ± 0.28
沼泽湿地 Marsh wetland	112.37 ± 14.37	67.63 ± 3.53	45.43 ± 3.64	100.20 ± 5.84	35.53 ± 5.64	18.61 ± 3.24	0.27 ± 0.09
湖泊湿地 Lake wetland	107.70 ± 18.30	51.37 ± 10.39	36.47 ± 7.68	111.67 ± 33.75	25.07 ± 10.76	14.00 ± 1.86	0.18 ± 0.10
沟渠 Ditch	182.90 ± 218.10	53.08 ± 16.14	28.33 ± 12.28	95.05 ± 33.23	36.78 ± 28.87	17.70 ± 4.36	0.15 ± 0.08
池塘 Pond	180.29 ± 188.06	38.53 ± 20.09	40.25 ± 9.30	120.73 ± 26.14	47.07 ± 40.90	17.72 ± 4.54	0.14 ± 0.13
玉米地 Corn field	115.43 ± 6.83	47.57 ± 16.14	44.27 ± 4.35	126.77 ± 18.27	31.80 ± 2.63	18.43 ± 2.24	0.29 ± 0.29
水田 Paddy field	100.74 ± 22.89	53.21 ± 20.28	35.00 ± 13.32	103.36 ± 38.45	29.53 ± 5.01	12.13 ± 3.87	0.12 ± 0.12
油菜地 Rape field	109.35 ± 0.64	36.05 ± 8.70	36.65 ± 5.16	116.05 ± 19.73	34.25 ± 0.92	19.27 ± 7.19	0.35 ± 0.40
林地 Forest land	128.60 ± 30.05	70.47 ± 12.51	44.63 ± 4.51	124.53 ± 24.69	24.53 ± 6.53	16.84 ± 5.36	0.08 ± 0.06
菜地 Vegetable field	116.13 ± 35.00	44.50 ± 23.33	41.50 ± 25.02	97.46 ± 40.25	41.18 ± 19.60	20.60 ± 12.66	0.17 ± 0.14
国家二级标准 Grade two standard of national soil environment quality	200.00	300.00	50.00	300.00	100.00	25.00	0.50

**3.3 土壤重金属相关性分析** 会仙湿地土壤表层中 As、Pb、Zn、Cr、Ni、Cu 和 Hg 7 种重金属间的相关性分析见表 5。由表 5 可知,Zn 与 Ni、Cr、Cu、As、Pb 与 Cr、Ni 与 Cr、Cu、As、Cr 与 As 以及 Cu 与 As 之间存在极显著相关( $P < 0.01$ ),Ni、As 与 Hg 呈显著相关( $P < 0.05$ )。土壤重金属元素间的显著相关性说明在重金属积累过程中,这些重金属元素的迁移情况、蓄积量等具有相同的变化趋势,也可有效地指示重金属的同一物质来源<sup>[18]</sup>。因此,Zn、Ni、Cr、Cu、As 5 种重金属的相关性推测其可能有相同来源,具有一定协同组合性。农药和化肥的大量使用是造成其重金属积累的原因<sup>[19]</sup>。Pb 仅与 Cr 呈极显著相关( $P < 0.01$ ),而与其他重金属元素之间均未

表现出相关性,说明 Pb 与其他重金属元素的来源不同,这是受到会仙湿地周边复杂的地理环境和人为因素的影响所致<sup>[20]</sup>。

**3.4 不同土地利用类型土壤重金属污染评价** 由表 6 可知,单因子指数结果显示,Pb > Zn > Ni > Hg > Cr > Cu > As;不同土地利用类型结果显示,Pb 呈中度污染(除池塘、油菜地、菜地轻度污染外),Zn 为轻度污染(除沟渠、池塘呈中度污染外),Ni、Cr 为轻度污染,Cu 为轻度污染(除湖泊湿地、林地处于警戒程度外),As 处于警戒程度(除湖泊湿地、水田处于安全状态),Hg 为轻度污染(除河流湿地重度污染、油菜地中度污染外)。综合污染指数结果显示,河流湿地 > 林地 > 沼泽

表5 会仙湿地土壤重金属相关性系数

Table 5 Correlation of heavy metals contents in the soils of Huixian Wetland

重金属元素 Heavy metal element	Zn	Pb	Ni	Cr	Cu	As	Hg
Zn	1.000	-0.154	0.669**	0.331**	0.645**	0.476**	0.129
Pb		1.000	-0.022	-0.329**	0.029	0.065	0.010
Ni			1.000	0.483**	0.447**	0.627**	0.324*
Cr				1.000	-0.057	0.381**	-0.127
Cu					1.000	0.419**	0.197
As						1.000	0.306*
Hg							1.000

注: \*\* . 在置信度(双测)为0.01时,相关性显著; \* . 在置信度(双测)为0.05时,相关性显著。

Note: \*\* indicated that when confidence coefficient was 0.01, the correlation was significant. \* indicated when confidence coefficient was 0.05, the correlation was significant.

表6 会仙湿地不同土地利用类型土壤重金属污染评价指数

Table 6 Pollution evaluation indexes of soil heavy metals in Huixian Wetland

土地利用类型 Land use types	$P_i$							$P_N$
	Zn	Pb	Ni	Cr	Cu	As	Hg	
河流湿地 River wetland	1.65	2.30	1.84	1.28	1.28	0.98	3.42	2.74
沼泽湿地 Marsh wetland	1.49	2.82	1.71	1.22	1.28	0.91	1.78	2.29
湖泊湿地 Lake wetland	1.42	2.14	1.37	1.36	0.90	0.68	1.18	1.77
沟渠 Ditch	2.42	2.21	1.07	1.16	1.32	0.86	0.99	1.99
池塘 Pond	2.38	1.61	1.51	1.47	1.69	0.86	0.92	1.99
玉米地 Corn field	1.53	1.98	1.66	1.54	1.14	0.90	1.91	1.77
水田 Paddy field	1.33	2.22	1.32	1.26	1.06	0.59	0.79	1.79
油菜地 Rape field	1.45	1.50	1.38	1.41	1.23	0.94	2.30	1.93
林地 Forest land	1.70	2.94	1.68	1.52	0.88	0.82	0.53	2.31
菜地 Vegetable field	1.54	1.85	1.56	1.19	1.48	1.00	1.12	1.64
平均 Mean	1.69	2.16	1.51	1.34	1.23	0.77	1.49	

湿地 > 沟渠 = 池塘 > 油菜地 > 水田 > 玉米地 = 湖泊湿地 > 菜地; 其中, 河流湿地、林地、沼泽湿地呈中度污染, 其他土地利用类型土壤属于轻度污染。

仅 As 元素单因子污染指数低于 1.0, 其他重金属元素均超过 1.0, 说明会仙湿地土壤重金属表现为富集现象。其中, Pb 和 Zn 污染程度较高, 次煤、垃圾燃烧和交通工具使用含 Pb 汽油等, 都可能造成土壤 Pb 含量升高; 采样区域内集约化养殖场大多使用饲料添加剂, 由于其含有高含量的 Zn 等元素, 使得土壤 Zn 含量增加<sup>[21]</sup>。内梅罗综合指数结果表明, 河流湿地、沼泽湿地和林地综合指数均大于 2.0, 池塘和沟渠接近于 2.0, 呈中度污染。其主要受到 Pb、Hg、Zn 元素的影响, 人类对湿地的干扰, 可能使历史时期积累的 Hg 逐渐释放, 使其含量增加<sup>[22]</sup>; 另外, 大气中 Hg 和 Pb 含量对土壤影响也较大, 造成河流湿地、沼泽湿地和林地在一定程度上受到污染<sup>[23]</sup>。

#### 4 结论

广西会仙湿地土壤表层(0~20 cm)重金属 Zn、Pb、Ni、Cr、Cu 平均含量均高于广西土壤背景值, 仅 As 和 Hg 含量低于背景值; 与国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)相比, 河流湿地 Hg 元素含量高于国家二级标准, 呈重度污染; 其他重金属含量接近或低于国家二级标准, 呈中度或轻度污染; 不同土地利用类型土壤重金属含量差异较大, 其中, 菜地、沟渠、池塘、林地等因靠近养殖场、化工厂、道路附近, 污

染较为严重; Zn、Ni、Cr、Cu、As 可能具有相同来源, 主要是肥料、农药和污水排放等因素, 而 Pb 与其他重金属元素具有一定差异, 具有其独特性。综合污染指数结果表明, 河流湿地、沼泽湿地和林地处于中度污染; 其他土地利用类型土壤呈轻度污染。会仙湿地土壤重金属污染已经对湿地生态系统的健康发展造成一定程度的威胁。

#### 参考文献

- [1] 吴志勇, 黄川友. 湿地构成变化与湿地保护[J]. 环境科学与技术, 2001, 24(S2): 32-34.
- [2] 梁尚明. 拯救“桂林之肾——会仙湿地”[J]. 当代广西, 2010(1): 26-27.
- [3] 李辉, 王月, 王艳分. 桂林会仙喀斯特湿地生态环境调查及生态旅游开发[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(27): 15286-15289.
- [4] 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 629-638.
- [5] 刘影, 伍钧, 杨刚, 等. 3种能源草在铅锌矿区土壤中的生长及其对重金属的富集特性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 291-296.
- [6] 郝泽嘉, 周丰, 郭怀成. 香港海域表层沉积物重金属空间分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 110-117.
- [7] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2016-08-13]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm).
- [8] 李世杰, 蔡德昕, 张宏亮, 等. 桂林会仙岩溶湿地环境变化沉积记录的初步研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 94-100.
- [9] 韦锋. 桂林会仙喀斯特湿地生物多样性及保护研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2010: 4-5.
- [10] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [11] 陈永欣, 黎香荣, 韦新红, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定土壤和沉积物中痕量稀土元素[J]. 岩矿测试, 2011, 35(5): 560-565.

仔猪血清的 T-AOC 和肝脏中的 CAT、SOD 的活力,显著降低血清和肝脏中丙二醛的含量,结果与前人研究结果基本一致。低聚木糖调节肠道菌群可能是其发挥抗氧化作用的机制之一。前人研究表明低聚木糖在促进肠道乳酸菌的增殖,抑制大肠杆菌的增殖同时,低聚木糖还能够增强乳酸菌自身抗氧化能力<sup>[11,28]</sup>、有减缓机体氧化应激的效果<sup>[29]</sup>。体内的亚铁离子能够加快大肠杆菌的增殖,同时大肠杆菌会产生超氧阴离子自由基。但是,乳酸菌不仅可以产生 SOD 清除自由基,而且能够抑制亚铁离子系统中脂过氧化物的形成。因此,低聚木糖可以通过调节肠道微生物区系提高机体的抗氧化能力。

#### 4 结论

日粮中添加适量低聚木糖能够改善断奶仔猪的生长性能,降低仔猪的腹泻率,同时还能够提高仔猪的抗氧化能力。低聚木糖的适宜添加量为 200 mg/kg。

#### 参考文献

- [1] 本刊. 美国计划三年后禁止饲料添加预防性抗生素[J]. 江西畜牧兽医杂志,2014(5):29.
- [2] YIN Y L, TANG Z R, SUN Z H, et al. Effect of galacto-mannan-oligosaccharides or chitosan supplementation on cytoimmunity and humoral immunity in early-weaned piglets[J]. Asian Australasian journal of animal sciences, 2008, 21(5): 723-731.
- [3] YANG C M, FERKET P R, HONG Q H, et al. Effect of chito-oligosaccharide on growth performance, intestinal barrier function, intestinal morphology and cecal microflora in weaned pigs[J]. Journal of animal science, 2012, 90(8): 2671-2676.
- [4] DE MAESSCHALCK C, EECKHAUT V, MAERTENS L, et al. Effects of xylo-oligosaccharides on broiler chicken performance and microbiota[J]. Applied and environmental microbiology, 2015, 81(17): 5880-5888.
- [5] POURABEDIN M, GUAN L, XIN Z. Xylo-oligosaccharides and virginiamycin differentially modulate gut microbial composition in chickens[J]. Microbiome, 2015, 3(1): 1-12.
- [6] 宋晓春. 低聚木糖在仔猪和生长育肥猪生产中应用的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [7] 郭小云, 谢春艳, 吴信, 等. 围产期母猪日粮中添加低聚木糖和活性酵母对哺乳仔猪血液生化及免疫力的影响[C]//李爱科, 李绍钰. 中国畜牧兽医学学会动物营养学分会中国饲料营养学术研讨会论文集. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [8] 徐丽萍, 马明颖. 低聚木糖对雏鸡生长性能、免疫功能及营养物质利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(13): 7835-7836.
- [9] 丁苏. 微波合成低聚木糖及其抗氧化与降血脂作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [10] 吴秋珏, 徐廷生, 王玉琴, 等. 低聚木糖对断奶仔猪生产性能的影响[J]. 当代畜牧, 2007(11): 32-34.
- [11] 王继成, 潘灵辉, 李淑云, 等. 低聚木糖对断奶仔猪生产性能、肠道菌群

及免疫水平影响的研究[J]. 中国畜牧兽医, 2006, 33(5): 3-7.

- [12] 周韶, 黄华山, 杨在宾, 等. 低聚木糖对仔猪生产性能和肠道微生物影响的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 84-88.
- [13] 扶国才, 罗有文, 周岩民. 低聚木糖对生长猪生产性能和抗氧化功能的影响[J]. 江苏农业科学, 2009(1): 221-222.
- [14] MARINHO M C, PINHO M A, MASCARENHAS R D, et al. Effect of prebiotic or probiotic supplementation and ileo rectal anastomosis on intestinal morphology of weaned piglets[J]. Livestock science, 2007, 108(1): 240-243.
- [15] 杨海英, 杨在宾, 杨维仁, 等. 益生菌和低聚木糖对断奶仔猪生产性能和肠道形态学影响研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(1): 116-120.
- [16] 吴银宝, 汪植三. 早期断奶仔猪腹泻的研究概述[J]. 家畜生态学报, 1999, 20(3): 45-48.
- [17] LIU P, PIAO X S, KIM S W, et al. Effects of chito-oligosaccharide supplementation on the growth performance, nutrient digestibility, intestinal morphology, and fecal shedding of *Escherichia coli* and *Lactobacillus* in weaning pigs[J]. J Anim Sci, 2008, 86(10): 2609-2618.
- [18] 车向荣, 岳文斌, 臧建军, 等. 功能性低聚糖对断奶仔猪腹泻的防治及生产性能的影响[J]. 中国兽医学报, 2003, 23(3): 292-294.
- [19] GIBSON G R, WANG X. Regulatory effects of bifidobacteria on the growth of other colonic bacteria[J]. Journal of applied bacteriology, 1994, 77(4): 412-420.
- [20] OTERO M C, NADER-MACÍAS M E. Inhibition of *Staphylococcus aureus* by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-producing *Lactobacillus gasseri* isolated from the vaginal tract of cattle[J]. Animal reproduction science, 2006, 96(1/2): 35-46.
- [21] PARVEZ S, MALIK K A, AH KANG S, et al. Probiotics and their fermented food products are beneficial for health[J]. Journal of applied microbiology, 2006, 100(6): 1171-1185.
- [22] OKAZAKI M, FUJIKAWA S, MASTUMOTO N. Effect of xylo-oligosaccharide on the growth of bifidobacteria[J]. Bifidobacteria and microflora, 1990, 9(2): 77-86.
- [23] BAUMGART D C, DIGNASS A U. Intestinal barrier function[J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2002, 5(6): 685-694.
- [24] OLI M W, PETSCHOW B W, BUDDINGTON R K. Evaluation of fructooligosaccharide supplementation of oral electrolyte solutions for treatment of diarrhea (recovery of the intestinal bacteria)[J]. Digestive diseases and sciences, 1998, 43(1): 138-147.
- [25] 黄晓凤, 程翔. 氧化应激与高血压[J]. 西部医学, 2007, 19(4): 695-697.
- [26] ZHU L H, ZHAO K L, CHEN X L, et al. Impact of weaning and an antioxidant blend on intestinal barrier function and antioxidant status in pigs[J]. Journal of animal science, 2012, 90(8): 2581-2589.
- [27] 李志明, 周岩民, 吴秋珏. 不同粒度低聚木糖对断奶仔猪生产性能、血清生化、抗氧化和粪便微生物的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2016(4): 63-66.
- [28] 贾丽丽, 孙进, 乐国伟, 等. 低聚糖对乳酸菌抗氧化胁迫能力的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 191-194.
- [29] SUN J, HU X L, LE G W, et al. Lactobacilli prevent hydroxy radical production and inhibit *Escherichia coli* and *Enterococcus*, growth in system mimicking colon fermentation[J]. Letters in applied microbiology, 2010, 50(3): 264-269.

#### (上接第 38 页)

- [12] 陈昌盛. 水浴消解-原子荧光光谱法测定土壤中的砷[J]. 环保科技, 2009, 15(2): 26-27.
- [13] 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: 330-378.
- [14] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1561-1567.
- [15] BAI J H, CUI B S, CHEN B, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China[J]. Ecological modelling, 2011, 222(2): 301-306.
- [16] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 116-120.
- [17] 于君宝, 董洪芳, 王慧彬, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤重金属元素空间分布特征[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 297-304.
- [18] GAILEY F A Y, LLOYD O L. Spatial and temporal patterns of airborne

metal pollution: The value of low technology sampling to an environmental epidemiology study[J]. Science of the total environment, 1993, 133(3): 201-219.

- [19] ZHAO L L, YOU W B, HU H Q, et al. Spatial distribution of heavy metals (Cu, Pb, Zn, and Cd) in sediments of a coastal wetlands in eastern Fujian, China[J]. Journal of forestry research, 2015, 26(3): 703-710.
- [20] 陈雪龙, 齐艳萍, 吴海燕, 等. 大庆龙凤湿地土壤重金属空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 141-144.
- [21] 王济, 王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, 23(2): 113-120.
- [22] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地表的地球化学特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 661-663.
- [23] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3654-3662.