

# 扎龙湿地土壤重金属含量与土壤理化性质的相关性研究

郝 宇, 张 艳 馥, 刘 丽 杰, 潘 琳, 金 忠 民

(齐齐哈尔大学 生命科学与农林学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘 要:**以黑龙江省扎龙湿地的土壤为试材,利用相关分析和通径分析研究了土壤理化性质与重金属含量之间的关系。结果表明:全 K 与 Fe、全 K 和 Co、全 K 和 Cr 含量之间具有明显的负相关关系,相关系数分别为-0.866、-0.771 和-0.850;Cu 和 Fe、Co 和 Cu、Cr 和 Cu、Fe 和 Co、Fe 和 Cr 以及 Cr 和 Co 之间具有明显的正相关关系,相关系数分别为 0.832、0.844、0.807、0.956、0.816、0.830;Pb、Cd、Cr、Mn 分别对 pH 具有较强的正向直接作用;Cr 对电导率表现为很大正向的直接作用;Cr、Pb 分别对全 K 有很大的负向直接作用;Fe、Zn、Co、Cr、Cd、Mn 分别对  $\text{Ca}^{2+}$  具有较强的正向直接作用;Pb 对  $\text{Na}^+$  有很强正向直接作用;Cr、Co、Cd、Mn、Fe 分别对  $\text{Ba}^{2+}$  的直接正向作用最大。

**关键词:**土壤理化性质;重金属;相关分析;通径分析

**中图分类号:**S 152 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)24-0167-05

重金属因具有难降解、易积累等特点成为当今环境的主要污染物<sup>[1]</sup>,对环境污染毒性最显著的重金属有 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cd、Co、Cr、Ni 以及 As 等<sup>[2-3]</sup>。古一帆等<sup>[4]</sup>研究表明,土壤的理化性质与重金属密切相关,可以通过分析重金属含量来反映土壤理化性质的变化并对了土壤的潜在威胁进行评估。Duan 等<sup>[5]</sup>通过土壤重金属和土壤中的磁参数进行分析表明这二者之间对土壤的污染存在线性关系,Gongalsky 等<sup>[6]</sup>利用土壤中的重金属和土壤中的动物进行研究说明了土壤重金属的含量高低能直接影响土壤中动物体内的重金属变化并且呈正相关。综上所述,土壤重金属含量是一个重要的参数且已成为环境领域的一个研究方向,因此,土壤重金属的总量也可以代表该地区的潜在生态风险性。但是,目前对湿地土壤理化性质与土壤重金属关系尚不了解,因此对扎龙湿地土壤的理化性质和重金属含量之间的相关性进行研究很有必要。

1992 年,拉姆萨尔公约(Ramsar Convention)将扎龙列为国际重要湿地,是亚洲十大湿地之一,在世界珍稀水禽保护和繁育中占有极其重要地位,但由于农业生

产污水排放、水利工程的修建、以及土地的过度使用等原因导致重金属的积累,对湿地环境造成了破坏,目前,这一问题已经成为研究的热点<sup>[7-10]</sup>。该试验对扎龙湿地土壤质量进行取样调查并对土壤的理化性质和重金属含量进行相关性分析,以期了解它们之间的联系,为合理利用土壤、土壤的监测与修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自地理坐标为东经  $123^{\circ}47'$ ~ $124^{\circ}37'$ ,北纬  $46^{\circ}52'$ ~ $47^{\circ}32'$ 位于黑龙江省西部松嫩平原乌裕尔河下游的扎龙自然保护区,该试验在污染比较严重的 10 个区域等距离均匀选取了 10 个土壤样本,土壤类型均为水底淤泥,采样点的顺序依次为样本 1~10,根据乔胜英<sup>[11]</sup>的方法进行。

试验仪器:电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由美国安捷伦公司生产;雷磁 pH 计型号为 pH-25;雷磁电导仪型号为 DDS-307。

### 1.2 试验方法

采样点通过 S 形均匀取混合土样,深宽和厚度在 0~15 cm,共 10 个土壤样本,共计 20 个土壤样本,每个样本采集的土壤为 1 kg 左右,土壤采集后放入带有标签的封口袋中,带回实验室进行风干、过筛、研磨、烘干、保存,备用。

### 1.3 项目测定

1.3.1 土壤重金属含量的测定 选取每个土壤样品各

**第一作者简介:**郝宇(1989-),男,硕士研究生,研究方向为遗传学。  
E-mail:hao\_yu@sina.com

**责任作者:**金忠民(1968-),女,博士研究生,研究方向为遗传学。  
E-mail:jinzhangmin2008@sohu.com

**基金项目:**黑龙江省自然科学基金资助项目(C201240)。

**收稿日期:**2013-09-09

0.5 g 通过消解采用电热板/盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解法预处理后,用原子吸收分光光度法测定土壤消解液中的 Cu、Fe、Zn、Mn、Pb、Cd、Co 等 7 种重金属的含量<sup>[12]</sup>。

1.3.2 土壤理化性质的测定 参照张韫<sup>[13]</sup>和鲁如坤<sup>[14]</sup>的试验方法,pH 值按照沉积物与去离子水比 1:5 混匀,静置 30 min,采用雷磁 pH 计进行测定;电导率(EC)按照 5:1 将水土混匀,静置 30 min 后利用雷磁电导仪进行测定;全钾(K)采用消解法进行测定;钙离子(Ca<sup>2+</sup>)采用原子吸收分光光度法进行测定;钠离子(Na<sup>+</sup>)采用火焰光度法进行测定;钡离子(Ba<sup>2+</sup>)采用硫酸钡比浊法进行测定<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 数据分析

测得的数据通过 SPSS 13.0 统计软件进行相关性分析和通径分析<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 扎龙湿地土壤中的重金属离子含量

从表 1 可以看出,扎龙湿地土壤中 Fe 的含量最高,Cd 的含量最低。这说明 Fe 在碱性土壤中易被沉淀且利用率不高。根据土壤环境质量标准(GB-15618-1995)<sup>[17]</sup>,扎龙湿地的重金属含量均低于标准值,表明重金属含量不是导致扎龙湿地污染的主要原因。

表 1 扎龙湿地土壤重金属离子含量

Table 1 Heavy metal ion content in soil of Zhalong wetlands mg/kg

样品号	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
1	0.0077	14.816	0.345	0.034	0.0005	0.005	0.033	0.027
2	0.0095	15.256	0.385	0.034	0.0006	0.006	0.027	0.024
3	0.0062	11.566	0.274	0.028	0.0004	0.005	0.027	0.024
4	0.0031	6.494	0.151	0.025	0.0004	0.002	0.008	0.017
5	0.0087	18.006	0.443	0.033	0.0004	0.007	0.027	0.029
6	0.0048	11.626	0.355	0.027	0.0003	0.005	0.018	0.042
6	0.0066	12.236	0.330	0.028	0.0004	0.005	0.014	0.007
8	0.0086	11.066	0.266	0.027	0.0006	0.004	0.018	0.006
6	0.0110	28.256	0.392	0.025	0.0003	0.009	0.036	0.036
10	0.0036	9.001	0.260	0.023	0.0003	0.003	0.011	0.006

### 2.2 扎龙湿地土壤的理化性质

由表 2 可以看出,土壤 pH 均大于 7,这说明扎龙湿

地土壤呈碱性,这与北方地区的气候干旱暴晒天气导致土地水分蒸发量暴增盐分聚积成为碱性土壤的盐碱地有关,样本 1、9 的电导率偏大,这说明这 2 个地区的土壤较其它地区的含盐量高。K 和 Na 的含量相当,这说明了 K 和 Na 之间存在协同作用,Na<sup>+</sup>在一定程度上可以代替全 K<sup>[18]</sup>。Ca<sup>2+</sup> 含量的很低,这可能是因为植物的生长需要大量的土壤钙元素<sup>[15]</sup>。该地区的 Ba<sup>2+</sup> 含量较低,因其对土壤中 PAHs 解析具有促进作用,说明该地区土壤在一定程度上不利于 PAHs 的降解<sup>[19]</sup>。

表 2 土壤理化性质指标

Table 2 Soil properties

样品号	pH	电导率 EC /μS·cm <sup>-1</sup>	全 K /mg·kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	Ba <sup>2+</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>
1	9.85	735	13.53	1.93	19.20	0.29
2	8.90	266	14.75	5.11	14.99	0.32
3	8.49	210	15.34	3.29	18.62	0.34
4	8.28	161	17.46	0.40	17.79	0.18
5	8.24	176	13.80	2.80	13.80	0.24
6	7.88	150	17.83	1.20	17.83	0.29
7	8.68	365	16.78	0.79	16.78	0.28
8	8.45	175	16.23	0.71	16.23	0.26
9	7.99	967	11.43	3.75	11.43	0.28
10	8.25	339	15.54	1.12	15.54	0.27

### 2.3 土壤重金属含量与土壤理化性质的相关性分析

由表 3 可以看出,土壤重金属含量与土壤理化性质指标之间存在着不同程度的相关性。有的相关性达到极显著负相关,如全 K 与 Fe、全 K 和 Co、全 K 和 Cr 含量之间相关系数分别为-0.866、-0.771 和-0.850。pH 与 Pb 的相关性比较显著,Fe 和 EC、Ca 和 Cr 比较显著、Na<sup>+</sup> 和 Fe、Na<sup>+</sup> 和 Co 比较显著。重金属离子之间也存在不同程度的相关性,有的也达到非常显著的正相关,如 Cu 和 Fe、Co 和 Cu、Cr 和 Cu、Fe 和 Co、Fe 和 Cr 以及 Cr 和 Co 之间相关系数分别为 0.832、0.844、0.807、0.956、0.816、0.830。

表 3 土壤重金属含量之间及与理化性质指标之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between heavy metals content indicators and with soil physicochemical properties

	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	1							
Fe	0.832**	1						
Mn	0.718*	0.737*	1					
Pb	0.489	0.202	0.590	1				
Cd	0.398	-0.148	0.000	0.600	1			
Co	0.844**	0.956**	0.859**	0.337	-0.109	1		
Cr	0.807**	0.816**	0.700*	0.549	0.147	0.830**	1	
Zn	0.288	0.544	0.548	0.282	-0.314	0.603	0.609	1
pH	0.182	-0.082	0.062	0.666*	0.597	-0.096	0.323	-0.166
EC	0.505	0.738*	0.328	0.007	-0.193	0.569	0.637*	0.272
全 K	-0.753	-0.866**	-0.585	-0.298	0.008	-0.771**	-0.850**	-0.338
Ca <sup>2+</sup>	0.670*	0.629	0.606	0.501	0.205	0.702*	0.751*	0.470
Na <sup>+</sup>	-0.608	-0.747*	-0.512	0.116	0.181	-0.679*	-0.326	-0.148
Ba <sup>2+</sup>	0.352	0.244	0.426	0.308	0.134	0.393	0.525	0.229

注:\*\*代表 0.01 水平下差异显著;\*代表 0.05 水平下差异显著。

Note:\*\* indicates significant difference at 0.01,\* indicates significant difference at 0.05.

## 2.4 通径分析

为了进一步分析土壤重金属含量和土壤的理化性质之间的直接影响和间接影响,在相关性分析的基础上利用通径分析进行解释说明。

2.4.1 重金属含量与 pH 之间的通径分析 由表 4 可知,Cu、Co、Zn 分别对 pH 都有很小的负向直接作用,但通过正向的间接作用,使得 Co、Fe、Mn、Cr、Pb、Zn 与 pH 之间具有一定的正相关性。Pb 对 pH 表现了直接正向

作用,而间接作用增加了 pH 的关联性。Fe 对 pH 正向直接作用的影响很小,但通过较强负向的间接作用,使得 Co、Cu、Mn、Cr、Pb、Zn、Cd 和 pH 之间具有一定的负相关。Cd、Mn、Cr 分别对 pH 为正向直接作用,但通过很大的负向间接作用,使得 Cd、Mn、Cr 分别对 pH 的相关性下降。Zn 对 pH 表现为负向直接作用,并通过正向间接作用的增加使得 Co、Cu、Mn、Cr、Pb、Fe、Cd 与 pH 的正相关。

表 4 重金属含量与 pH 之间的通径分析

Table 4 Path analysis between heavy metal content and pH

	直接作用		与 pH 相关系数		间接作用(间接通径系数)					
	(通径系数)	(相关系数)	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	-1.945	0.182		1.253	0.152	0.244	0.349	-0.477	0.797	-0.192
Fe	1.507	-0.082	-1.618		0.156	0.100	-0.130	-0.540	0.806	-0.363
Mn	0.212	0.062	-1.397	1.110		0.293	0.158	-0.485	0.691	-0.366
Pb	0.497	0.666	-0.951	0.304	0.125		0.527	-0.190	0.542	-0.188
Cd	0.878	0.597	-0.774	-0.223	0	0.298		0.062	0.145	0.209
Co	-0.565	0.096	-1.641	1.440	0.182	0.167	-0.096		0.820	-0.402
Cr	0.988	0.323	-1.570	1.230	0.148	0.272	0.129	-0.469		-0.406
Zn	-0.667	-0.166	-0.560	0.820	0.116	0.140	-0.276	-0.340	0.601	

2.4.2 重金属含量与 EC 之间的通径分析 由表 5 可以看出,Cu、Pb、Co、Zn 对电导率均有很小的负向直接作用,但通过正向的间接作用,使得 Cr、Cd、Fe、Mn 与电导率之间具有一定的正相关性。Fe 对电导率正向的直接

作用很小,然而负向的间接作用很大。Cd 对电导率有很小的正向直接作用,但是负向的间接作用影响很大。Cr、Mn 对电导率表现为很大负向的间接作用,使得 Cr、Mn 对电导率的相关性下降。

表 5 重金属含量与 EC 之间的通径分析

Table 5 Path analysis between heavy metal content and EC

	直接作用		与 EC 相关系数		间接作用					
	(通径系数)	(相关系数)	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	-2.292	0.050		2.436	0.239	-0.144	0.388	-0.621	0.639	-0.142
Fe	2.928	0.738	-1.907		0.245	-0.059	-0.144	-0.704	0.646	-0.268
Mn	0.333	0.328	-1.646	2.158		-0.173	0	-0.632	0.554	-0.270
Pb	-0.294	0.007	-1.120	0.591	0.196		0.585	-0.248	0.435	-0.139
Cd	0.975	-0.193	-0.912	-0.433	0	-0.176		0.080	0.116	0.154
Co	-0.736	0.569	-1.934	2.799	0.286	-0.099	-0.106		0.657	-0.297
Cr	0.792	0.637	-1.850	2.389	0.233	-0.161	0.143	-0.610		-0.300
Zn	-0.492	0.272	-0.660	1.593	0.182	-0.083	-0.306	-0.444	0.482	

2.4.3 重金属含量与全 K 之间的通径分析 由表 6 可以看出,Cd 对 K 都有很小的负向直接作用,但通过正向的间接作用,使 Co、Fe、Zn、Pb、Mn、Cu、Cr 与全 K 之间具有一定的正相关性。然而,Cu、Co、Zn 分别对全 K 正向直接作用的影响很小,但通过较大反向的间接作用,使

Fe、Cd、Pb、Mn、Cr 和全 K 之间具有一定的负相关。Pb、Mn、Cr 分别对 K 的直接表现为负向,但通过负向间接作用增加了使 Co、Cd、Fe、Cu、Zn 与全 K 的负相关性。Fe 对全 K 负向直接作用,并通过正向间接作用的增加使得 Co、Cd、Zn、Pb、Mn、Cu、Cr 与全 K 的正相关。

表 6 重金属含量与全 K 之间的通径分析

Table 6 Path analysis between heavy metal content and total K

	直接作用		与 K 相关系数		间接作用					
	(通径系数)	(相关系数)	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	0.830	-0.753		-1.397	-0.109	-0.039	-0.073	0.543	-0.647	0.139
Fe	-1.679	-0.866	0.690		-0.112	-0.016	0.027	0.615	-0.654	0.263
Mn	-0.152	-0.585	0.596	-1.237		-0.046	0	0.552	-0.561	0.265
Pb	-0.078	-0.298	0.413	-0.339	-0.090		-0.110	0.217	-0.440	0.136
Cd	-0.183	0.008	0.330	0.248	0	-0.047		-0.070	-0.118	-0.152
Co	0.643	-0.771	0.701	-1.605	-0.131	-0.026	0.020		-0.666	0.291
Cr	-0.802	-0.850	0.670	-1.370	-0.106	-0.043	-0.027	-0.534		0.295
Zn	0.484	-0.338	0.239	-0.913	-0.083	-0.022	0.057	0.388	-0.488	

2.4.4 重金属含量与  $\text{Ca}^{2+}$  之间的途径分析 由表 7 可以看出 Cu、Pb、Zn 分别对  $\text{Ca}^{2+}$  都有很小的负向直接作用,但通过正向的间接作用,使得 Co、Fe、Cd、Mn、Cr 与  $\text{Ca}^{2+}$  之间具有一定的正相关性。Co、Cd、Fe 分别对  $\text{Ca}^{2+}$  表现为正向直接作用,但通过较强负向的间接作用,使

得 Co、Cd、Fe 分别对  $\text{Ca}^{2+}$  的相关性下降。Mn 对  $\text{Ca}^{2+}$  表现了直接正向作用,而间接作用增加了  $\text{Ca}^{2+}$  的关联性,说明 Mn 对  $\text{Ca}^{2+}$  的正向直接作用很大,正向间接作用很小。Cr 对  $\text{Ca}^{2+}$  表现为直接正向作用,但通过产生了较小的负向间接作用,使得 Cr 对  $\text{Ca}^{2+}$  的相关性下降。

表 7 重金属含量与  $\text{Ca}^{2+}$  之间的途径分析

Table 7 Path analysis between heavy metal content and  $\text{Ca}^{2+}$

	直接作用	与 $\text{Ca}^{2+}$ 相关		间接作用						
		系数	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	-8.651	0.670		2.188	0.426	-0.719	2.050	4.840	0.765	-0.230
Fe	2.630	0.629	-7.198		0.437	-0.297	-0.762	5.483	0.774	-0.434
Mn	0.593	0.606	-6.211	1.938		-0.868	0	4.926	0.664	-0.437
Pb	-1.471	0.501	-4.230	0.531	0.350		3.091	1.933	0.520	-0.225
Cd	5.152	0.205	-3.443	-0.389	0	-0.883		-0.625	0.139	0.250
Co	5.735	0.702	-7.301	2.514	0.509	-0.496	-0.562		0.787	-0.481
Cr	0.948	0.751	-6.981	2.146	0.415	-0.808	0.757	4.760		-0.486
Zn	-0.798	0.470	-2.491	1.431	0.325	-0.415	-1.618	3.458	0.577	

2.4.5 重金属含量与  $\text{Na}^{+}$  之间的途径分析 通过表 8 可以看出,Cu、Cr、Zn 分别对  $\text{Na}^{+}$  直接作用的影响很小,但通过反向的间接作用,使 Cd、Co、Fe、Mn、Pb 对  $\text{Na}^{+}$  之间具有一定的负相关。Pb 与  $\text{Na}^{+}$  产生了负向的间接作用,使得 Pb 对  $\text{Na}^{+}$  的相关性下降。Co、Fe 分别对  $\text{Na}^{+}$  表现为负向直接作用,而较大的正向间接作用,使得 Co、

Fe 分别对  $\text{Na}^{+}$  呈负相关。Mn 对  $\text{Na}^{+}$  表现为负向直接作用,而通过正向的间接作用使 Cu、Cr、Zn、Pb、Co、Fe、Cd 对  $\text{Na}^{+}$  呈正相关。Cd 对  $\text{Na}^{+}$  有很小的负向直接作用,但是通过正向间接作用,使 Cd 对  $\text{Na}^{+}$  具有一定的负相关。

表 8 重金属含量与  $\text{Na}^{+}$  之间的途径分析

Table 8 Path analysis between heavy metal content and  $\text{Na}^{+}$

	直接作用	与 $\text{Na}^{+}$ 相关		间接作用						
		系数	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	1.637	-0.608		-1.720	-0.370	0.263	-0.474	-0.576	0.566	0.072
Fe	-2.068	-0.747	1.362		-0.380	0.107	0.176	-0.653	0.572	0.135
Mn	-0.515	-0.512	1.175	-1.524		0.312	0	-0.587	0.491	0.136
Pb	0.528	0.116	0.800	-0.418	-0.304		-0.715	-0.230	0.385	0.070
Cd	-1.191	0.181	0.652	0.864	0	0.317		0.074	0.103	-0.078
Co	-0.683	-0.679	1.382	-1.977	-0.442	0.178	0.130		0.581	0.150
Cr	0.701	-0.326	1.321	-1.687	-0.361	0.290	-0.175	-0.567		0.152
Zn	0.249	-0.148	0.471	-1.125	-0.282	0.149	0.374	-0.412	0.427	

2.4.6 重金属含量与  $\text{Ba}^{2+}$  之间的途径分析 根据表 9 可以得知,Cu、Pb、Zn 分别对  $\text{Ba}^{2+}$  有很小的负向直接作用,但是通过 Co、Cd、Cr、Fe、Mn 的正向的间接作用,使 Co、Cd、Cr、Fe、Mn 与  $\text{Ba}^{2+}$  之间具有一定的正相关性;Mn、Cd、Co、Cr 分别对  $\text{Ba}^{2+}$  表现为正向直接作用,但是

通过 Cu、Pb、Zn、Fe 产生了很大的负向间接作用,使得了 Cd、Co、Mn、Cr 分别对  $\text{Ba}^{2+}$  的相关性下降。Fe 对  $\text{Ba}^{2+}$  直接作用很小(直接途径系数 0.062),但是通过 Cu、Co、Cr、Zn、Pb、Mn 的正向间接作用很大,从而增加了 Fe 对  $\text{Ba}^{2+}$  的相关度。

表 9 重金属含量与  $\text{Ba}^{2+}$  之间的途径分析

Table 9 Path analysis between heavy metal content and  $\text{Ba}^{2+}$

	直接作用	与 $\text{Ba}^{2+}$ 相关		间接作用						
		系数	Cu	Fe	Mn	Pb	Cd	Co	Cr	Zn
Cu	-7.396	0.352		0.052	1.106	-1.179	1.777	4.466	1.815	-0.288
Fe	0.062	0.244	-6.153		1.136	-0.487	-0.661	5.058	1.835	-0.543
Mn	1.541	0.426	-5.310	0.046		-1.422	0	4.545	1.574	-0.547
Pb	-2.411	0.308	-3.617	0.013	0.909		2.784	1.783	1.235	-0.282
Cd	4.464	0.134	-2.943	-0.009	0	-1.447		-0.577	0.331	0.314
Co	5.291	0.393	-6.242	0.060	1.324	-0.813	-0.487		1.867	-0.602
Cr	2.249	0.525	-5.969	0.051	1.079	-1.324	0.656	4.392		-0.608
Zn	-0.999	0.229	-2.130	0.034	0.844	-0.680	-1.402	3.190	1.370	



### 3 结论

根据相关性分析结果得知,扎龙湿地土壤重金属含量指标与土壤理化性质之间具有不同程度的相关性。其中,Fe 和 K 具有最显著的负相关,然而,Fe 和 Co 具有最显著的正相关。根据通径分析的结果可知,Pb、Cd、Cr、Mn 分别对 pH 具有较强的正向直接作用;Cr 对电导率表现为很大正向的直接作用;Cr、Pb 分别对全 K 有很大的负向直接作用;Fe、Zn、Co、Cr、Cd、Mn 分别对  $\text{Ca}^{2+}$  具有较强的正向直接作用;Pb 对  $\text{Na}^+$  有很强正向直接作用;Co、Cr、Cd、Mn、Fe 分别对  $\text{Ba}^{2+}$  的直接正向作用最大;同时土壤的理化性质还通过重金属指标产生间接的影响。综上所述,重金属在影响理化性质时存在着不同种程度的相关性,有待进一步了解其相关性,以期更好的保护和改善扎龙湿地提供参考。

#### 参考文献

- [1] 叶华香,臧淑英,张丽娟,等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2013(4):1334-1339.
- [2] 于瑞莲,胡恭任. 土壤中重金属污染源解析研究进展[J]. 有色金属,2008(60):159-165.
- [3] Colque R, Viladomat F, Bastida J, et al. Effect of PPM on Alkaloid production in Narcissus confuses shoot-culture[J]. Acta Hort, 2001, 560: 556-561.
- [4] 古一帆,何明,李进玲,等. 上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系[J]. 上海交通大学学报,2009,28(6):602-623.
- [5] Duan X M, Hu S Y, Yan H T, et al. Relationship between magnetic parameters and heavy element contents of arable soil around a steel company, Nanjing[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(3): 411-418.

- [6] Gongalsky K B, Filimonova Z V, Zaitsev A S. Relationship between soil invertebrate abundance and soil heavy metal contents in the environs of the Kosogorsky Metallurgical Plant, Tula oblast[J]. Russian Journal of Ecology, 2010, 41(1): 67-70.
- [7] 苏丹,臧淑英,叶华香,等. 扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别[J]. 环境科学,2012(33):1817-1822.
- [8] 吴长申. 扎龙国家级自然保护区-自然资源研究与管理[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1999:1-20.
- [9] 孔德坤,李春景,王永洁,等. 扎龙湿地土壤中重金属铬的对比分析[J]. 延边大学农学报,2013,35(2):62-65.
- [10] 刘波. 湿地的国内外研究进展对扎龙湿地保护的启示[J]. 资源环境学报,2012(18):220.
- [11] 乔胜英. 土壤理化性质实验指导书[M]. 中国地质大学出版社,2011:89.
- [12] 朱颜苹,段桂玲,元学,等. 原子吸收分光光度法测定土壤中的重金属[J]. 绿色科技,2012(7):175-176.
- [13] 张韞. 土壤水植物理化分析教程[M]. 北京:中国林业出版社,2011:262.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 中国环境监测站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境出版社,1990:330-416.
- [16] 李春喜,姜丽娜,邵云,等. 生物统计学[M]. 北京:科学出版社,2007:263-269.
- [17] 李俊波,华路,付鑫,等. 地表径流中 K、Na 流失量分析及其影响因素研究[J]. 中国水土保持,2005(2):5-7.
- [18] 吴刚,李金英. 土壤钙的生物有效性及与其它元素的相互作用[J]. 土壤与环境,2002,11(3):319-322.
- [19] 罗雪梅,刘昌明. 金属离子对长期污染土壤中多环芳烃解吸的影响[J]. 生态环境,2004,11(3):394-398.

## Study on Correlation Between Soil Properties and Heavy Metals Contents Isolated from Soils of Zhalong Wetlands

HAO Yu, ZHANG Yan-fu, LIU Li-jie, PAN Lin, JIN Zhong-min

(College of Life Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006)

**Abstract:** A correlation between the soil properties and heavy metals contents isolated from soils of Zhalong Wetlands in Heilongjiang was studied using correlation analysis and path analysis. The results showed that there was extremely significantly negative correlation between heavy metals and total K, Fe and total K, Co and total K, Cr and total K the relative coefficients were  $-0.866$ ,  $-0.771$ , and  $-0.850$ ; however, there was extremely significantly positive correlation between heavy metals, Cu and Fe, Co and Cu, Cr and Cu, Fe and Co, Fe and Cr, Cr and Co the relative coefficients were  $0.832$ ,  $0.844$ ,  $0.807$ ,  $0.956$ ,  $0.816$  and  $0.830$ ; Pb, Cd, Cr and Mn had strong positive direct effect on pH; Cd indicator had the lastest positive direct effect on conductivity; Cr and Pb had strong negative direct effect on total K; Pb, Cd, Cr and Mn had strong positive direct effect on  $\text{Ca}^{2+}$ ; Pb had the lastest positive direct effect on  $\text{Na}^+$ ; Co, Cr, Cd, Mn and Fe had the lastest positive direct effect on  $\text{Ba}^{2+}$ ; as well as soil properties indicators also had indirect effects on heavy metals through other indicators.

**Key words:** soil properties; heavy metals; correlation analysis; path analysis