

## 滇池沉积物金属污染及环境质量评价\*

陈云增<sup>1,2</sup>, 杨浩<sup>3</sup>, 张振克<sup>4</sup>, 秦明周<sup>1</sup>, 金峰<sup>2</sup>

(1: 河南大学资源与环境研究所, 开封 475001)

(2: 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

(4: 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 对滇池 126 个采样点沉积物 0–5cm、5–10cm 和 10–20cm 中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg 和 As 等 7 种金属的含量进行了分析测定。用基于多方的基准中阈值效应含量 TEC 和可能效应含量 PEC 划分出 5 个沉积物环境质量等级, 并借助灰色聚类分析方法对滇池沉积物环境质量进行了评价。结果表明, 滇池沉积物环境质量整体上为 III 类, 存在中度的金属污染。其中 0–5cm 和 5–10cm 为 III 类沉积物, 10–20cm 为 II 类沉积物。沉积物环境质量下层优于上层, 表明滇池沉积物金属污染仍存在不断加剧的趋势。

**关键词:** 基于多方的基准; 灰色聚类分析; 沉积物; 滇池

## Metal contamination and quality assessment of Lake Dianchi sediment

CHEN Yunzeng<sup>1,2</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>, ZHANG Zhenke<sup>4</sup>, QIN Mingzhou<sup>1</sup> & JIN Feng<sup>2</sup>

(1: *Institute of Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475001, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(3: *College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, P.R.China*)

(4: *Key Laboratory of Coast and Island Development of MOE, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R.China*)

**Abstract:** Sediment samples collected at 126 sites in Lake Dianchi were analyzed to determine their metal concentrations of copper, zinc, lead, cadmium, chromium, mercury, and arsenic at different depths of the sediment cores (0–5cm, 5–10cm and 10–20cm). Based upon the consensus-based sediment quality guidelines (CBSQGs), the threshold effect concentration (TEC) and the probable effect concentration (PEC), five sedimentary environment quality grades were classified and assessed by employing the method of the grey clustering analysis. Results showed that sedimentary environment quality in Lake Dianchi is mostly in the third grade (III) with a moderate metal contamination. Sediments are the third grade (III) at the depths of 0–5cm and 5–10cm, and the second grade (II) at the depth of 10–20cm. Generally, sedimentary environment qualities in the deeper layers are better than in the upper layers, indicating that metal contamination in Lake Dianchi sediments trends towards worse.

**Keywords:** Consensus-based sediment quality guidelines; grey clustering analysis; sediment; Lake Dianchi

近年来, 水体沉积物污染及其引发的环境和生态问题受到日益广泛的关注。国外对水体沉积物污染及环境评价的系统研究开始于 20 世纪 80 年代, 并在沉积物环境质量基准(Sediment Quality Guidelines, SQGs)的建立、沉积物毒性识别和污染物生物有效性及其影响因素研究等方面取得了较大进展<sup>[1]</sup>。但由于沉积物中金属污染物化学行为的复杂性, 迄今还没有提出能得到广泛认可的沉积物环境质量基准<sup>[2-3]</sup>。国外不同的研究者和管理部门根据不同的应用目的提出了各自的临时基准, 并在沉积物污染监测、毒性识

\* 中国科学院土壤与农业可持续发展国家重点项目(5022505)和国家自然科学基金项目(40473052)联合资助。2006-03-20 收稿; 2007-12-22 收修改稿。陈云增, 男, 1965 年生, 博士, 副教授; E-mail: yzchen@issas.ac.cn.

别和管理中得到应用<sup>[4]</sup>。我国对沉积物环境质量基准和环境质量评价的研究工作处于起步阶段, 由于还没有相应的沉积物环境质量基准和环境质量等级划分作为依据, 对沉积物金属污染的环境评价研究也只是与沉积物金属背景值的简单比较, 评价结果的可靠性存在较大局限<sup>[5-6]</sup>。

针对不同的沉积物环境质量基准间存在的差异, 以及各基准在应用范围上的局限性, 一些研究者尝试对现有基准进行收集、整理, 以建立能得到基于多方的基准(Consensus-Based SQGs, CBSQGs)<sup>[1]</sup>。如 Swartz<sup>[7]</sup>通过对“相似的”基准进行评估和统计分析, 提出了 PAHs 的多方基准。MacDonald 和 Ingersoll 等通过收集多种“相似的”淡水沉积物环境质量基准, 对这些基准进行分析、甄别和评估, 采用统计分析和毒性实验结果验证的方法, 提出了包括金属、PAHs 和 PCBs 等 28 种污染物的多方基准<sup>[8]</sup>。在对美国各地 347 个沉积物样品的毒性识别评估中, CBSQGs 对金属污染沉积物具有毒性的识别正确率在 76.9%–100% 之间, 其中 Hg 达到 100%; 对金属不具有毒性的识别正确率除 Hg(34.3%) 外在 72.3%–82.3% 之间。因此, CBSQGs 在金属污染沉积物的环境质量评价中具有较高的可靠性<sup>[6]</sup>。

滇池是我国污染最为严重的湖泊之一, 滇池沉积物中的金属污染物对底栖生物产生危害并对上覆水体水质状况产生影响<sup>[9-10]</sup>。通过高密度采样, 以基于多方的基准 CBSQGs 为依据, 用灰色聚类分析方法对滇池沉积物金属污染和环境质量进行评价, 以全面了解滇池沉积物中金属污染及环境质量状况, 为滇池沉积物污染的监测和治理提供可靠依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集和处理

样品采集分两次进行, 2002 年 4–6 月和 2005 年 6 月分别用 Uwitec 和 Anderson 重力采样器在滇池采集 126 个沉积物样品, 采样深度 20cm, 样点位置在全湖均匀布设, GPS 定位(图 1)。样品采集后于样品架上静置, 然后用用乳胶管吸除上覆水层, 再用分样装置将样品沉积物按 0–5cm, 5–10cm, 10–20cm 分段切割, 装入样品袋密封, 带回实验室用于分析沉积物中各金属元素含量。

### 1.2 分析测定方法

沉积物样品中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 和 As 含量测定采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消化, ICP-AES 测定, Hg 采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 消化, 冷原子吸收光谱法 CVAA 测定。

### 1.3 沉积物金属污染环境基准及环境质量等级划分方法

MacDonald 基于多方的 CBSQGs 属阈值型基准, 即包括一个基准高值和一个基准低值<sup>[6]</sup>。基准低值为阈值效应含量(Threshold Effect Concentration, TEC), 若沉积物某金属含量低于 TEC, 则沉积物中该金属不会对底栖生物产生毒性; 基准高值为可能效应含量(Possible Effect Concentration, PEC), 若沉积物某金属含量高于 PEC, 则沉积物中该金属会产生毒性; 如果金属含量在 TEC 和 PEC 之间, 则属于灰色区域(the Gray Zone), 沉积物会产生毒性和不会产生毒性的概率接近, CBSQGs 对沉积物是否具有毒性难以做出准确预测(Predication), 若金属含量接近 TEC, 则沉积物不会产生毒性的概率大于会产生毒性的概率, 反之则相反<sup>[7]</sup>。沉积物中各种金属的 TEC 和 PEC 值见

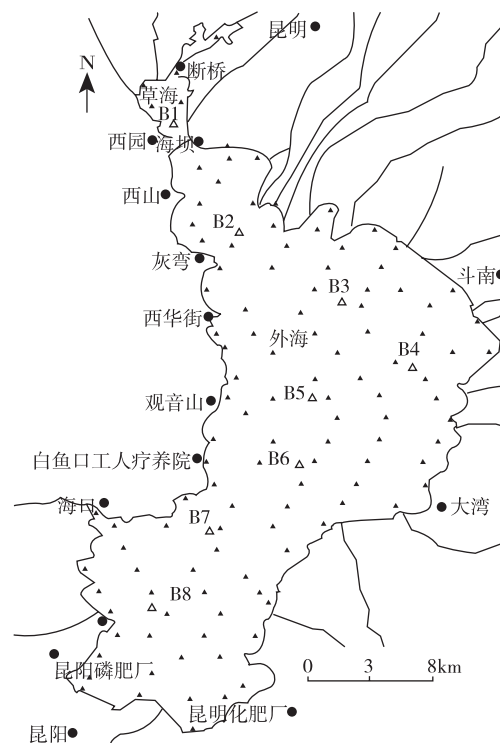


图 1 滇池沉积物样点位置

Fig.1 Locations of sediment sample sites in Lake Dianchi

表 1.

由于 CBSQGs 没有进行沉积物环境质量等级划分, 沉积物环境质量等级评价须根据 TEC 和 PEC 值划分沉积物环境质量等级. 划分方法为: 以 TEC、 $1/2[TEC+1/2(TEC+PEC)]$ 、 $1/2(TEC+PEC)$ 、 $1/2[PEC+1/2(TEC+PEC)]$ 、PEC 为划分指标, 参照我国地表水环境质量等级划分方法, 把沉积物划分为 I、II、III、IV、V 共 5 个环境质量等级(表 2).

表 1 基于多方基准的阈值效应含量和可能效应含量<sup>[7]</sup>

Tab.1 TEC and PEC Values in Consensus-Based SQGs

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Hg	As
TEC	31.60	121.00	35.80	43.40	0.99	0.18	9.79
PEC	149.00	459.00	128.00	111.00	4.98	1.06	33.00

表 2 沉积物环境质量等级划分方法

Tab.2 Method to determine the grades of sediment quality

等级	I	II	III	IV	V
分级指标	TEC	$1/2[TEC+1/2(TEC+PEC)]$	$1/2(TEC+PEC)$	$1/2[PEC+1/2(TEC+PEC)]$	PEC
产生毒性概率	不会产生毒性	小于 50%	50%左右	大于 50%	会产生毒性
沉积物质量	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

#### 1.4 沉积物环境质量评价方法

灰色聚类法是以白化函数生成为基础的方法<sup>[11-12]</sup>, 灰色聚类是将聚类对象(待评价环境单元)对不同聚类指标(评价因素)所拥有的白化数按  $p$  个灰类(类别)进行归纳整理, 从而判断聚类对象属于哪一类灰色类属. 用灰色聚类方法进行沉积物环境质量评价的步骤为:

若设各采样点为聚类对象  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n; n=126$ ); 参评金属元素为聚类指标  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m; m=7$ ); 沉积物环境质量等级为聚类灰类  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, p; p=5$ ); 通过分别生成各个聚类对象  $i$  的各个聚类指标  $j$  关于不同灰类  $k$  的白化函数  $f_{jk}(d_{ij})$ , 确定各个聚类指标  $j$  对于各个灰类  $k$  的聚类权  $\eta_{jk}$ , 然后计算各个聚类对象  $i$  对于不同灰类  $k$  的聚类系数, 并构造聚类向量, 按最大隶属原则, 判别聚类对象所属的灰类.

## 2 结果与讨论

### 2.1 滇池表层沉积物中金属含量及空间分布

滇池表层沉积物(0-20cm)126 个样点沉积物中金属含量分析结果见表 3.

从分析结果可以看出, 滇池表层沉积物中各金属含量水平分布很不均衡, 最高含量和最低含量间普遍存在数十倍甚至百倍以上(Cd 和 Hg)的差异, 其中高值区多出现在草海、外海北部、南部及入湖的河口区, 这些区域毗邻城市及沿湖工矿区, 反映出滇池金属污染物主要来自点源的特点. 从垂直分布上看, Cu 和 Cr 含量随沉积物深度减小而减小, 表明滇池沉积物中 Cu 和 Cr 污染整体上出现了减缓的趋势; Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 含量则随沉积物深度的减小而增大(图 2), 表明滇池沉积物中 Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 污染在不断加剧, 其中 As 在 0-5cm 含量比 5-10cm 略有减少, 表明滇池 As 污染近期得到了一定程度的遏制.

### 2.2 沉积物环境质量等级划分结果

根据 CBSQGs 中各金属 TEC 和 PEC 值(表 1)和表 2 的划分方法, 沉积物环境质量等级划分结果见表 4. 通过滇池沉积物表层各金属 0-20cm 平均含量(表 3)与沉积物环境质量等级划分指标值(表 4)比较可以看出, Cu 和 Pb 的平均含量在 II 类和 III 类之间, 即接近中度污染; Zn 平均含量接近 II 类, 属轻度污染, Cd 和 Hg 平均含量在 I 类和 II 类之间, 属轻度污染; Cr 和 As 平均含量在 IV 类和 V 类之间, 属重度污染.

表 3 滇池沉积物中金属污染物含量(mg/kg,干重)  
Tab.3 Metal concentration in Lake Dianchi sediment (mg/kg, dry weight)

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg
0-5cm	20.99-465.21	67.32-1717.80	16.81-591.56	0.04-123.10	12.07-1938.00	7.04-162.42	0.02-4.10
平均值	81.78	226.88	72.38	2.71	109.12	33.43	0.27
标准差	46.8	198.0	58.0	12.6	18.0	67.2	21.3
变异系数(%)	57.2	87.3	80.1	464.9	16.5	201.1	7888.9
5-10cm	21.42-290.52	53.79-1113.00	15.78-309.24	0.25-59.62	22.53-387.20	7.13-118.88	0.02-3.18
平均值	83.02	207.18	63.99	1.55	83.44	34.80	0.24
标准差	30.3	152.0	34.3	5.68	33.3	39.5	14.6
变异系数(%)	36.5	73.4	53.6	366.5	39.9	113.5	6083.3
10-20cm	23.63-187.65	43.48-806.51	18.22-167.56	0.23-24.14	24.73-4189.00	5.16-80.92	0.03-3.89
平均值	86.10	182.87	60.66	1.34	124.64	27.34	0.22
标准差	23.8	119.0	25.9	3.47	17.6	22.9	11.7
变异系数(%)	27.6	65.1	42.7	259.0	14.1	83.8	5318.2
0-20cm 平均值	83.63	205.64	65.68	1.87	105.73	31.86	0.24

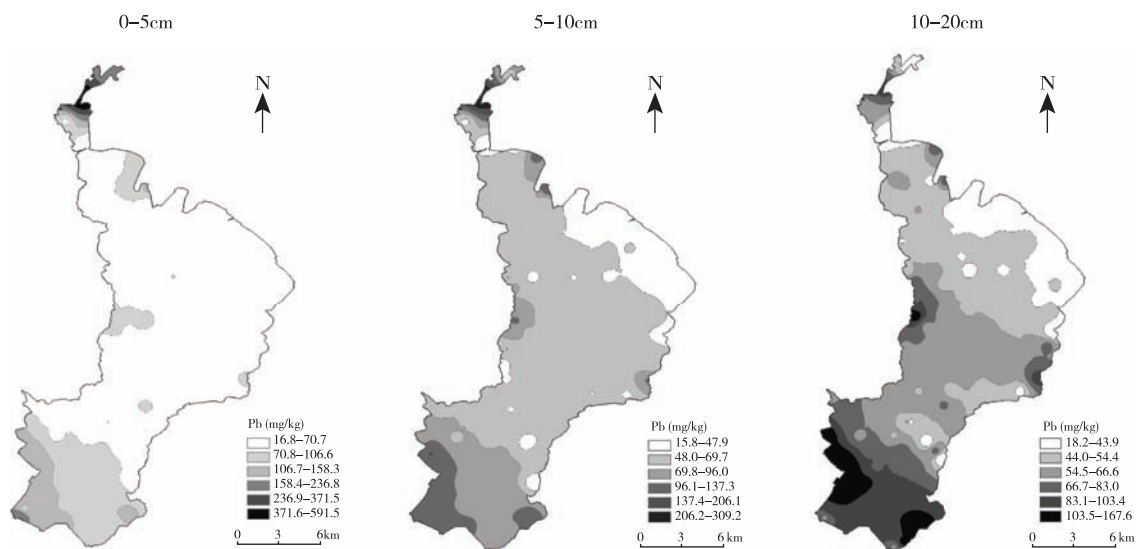


图 2 滇池不同层次沉积物中 Pb 的含量分布  
Fig.2 Spatial distribution of Pb in different sediment layers in Lake Dianchi

表 4 沉积物环境质量等级划分结果(mg/kg,干重)  
Tab.4 Indices and grades of sediment quality (mg/kg, dry weight)

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Hg	As
I 类	31.60	121.00	35.80	43.40	0.99	0.18	9.79
II 类	60.95	205.50	58.85	60.30	1.98	0.40	15.59
III 类	90.30	290.00	81.90	77.20	2.99	0.62	21.40
IV 类	119.65	374.5	104.95	94.10	3.98	0.84	27.20
V 类	149.00	459.00	128.00	111.00	4.98	1.06	33.00

### 2.3 沉积物金属含量和环境质量划分等级指标值的标准化处理

沉积物环境质量等级中各金属含量指标值以及各金属不同采样点实测含量间有很大的差别,因而不能直接进行计算,通常采取平均值法进行标准化处理,其中Ⅲ类沉积物各金属污染物的基准值为TEC和PEC的平均值,标准化处理结果均为1.

沉积物环境质量等级划分指标值和滇池沉积物金属实测含量标准化处理结果见表5,表6.

数据的标准化处理也可采用数据压缩的方法,即把所有数据压缩在[0, 1]之间,但由于滇池沉积物中各金属含量最大值和最小值间存在很大差异,如果采用数据压缩的方法会导致部分信息的损失,从而使评价结果出现误差.

表5 沉积物环境质量等级划分指标值的标准化处理结果  
Tab.5 Standardized indices of sediment quality grades

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Hg	As
I类	0.35	0.42	0.44	0.56	0.33	0.29	0.46
II类	0.67	0.71	0.72	0.78	0.66	0.65	0.73
III类	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
IV类	1.33	1.29	1.28	1.22	1.33	1.35	1.27
V类	1.65	1.58	1.56	1.44	1.67	1.71	1.54

表6 沉积物金属含量标准化处理结果  
Tab.6 Standardized metal concentration in Lake Dianchi sediment

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Hg	As
0-5cm	0.232-5.152	0.232-5.923	0.205-7.223	0.156-25.104	0.013-41.171	0.032-6.613	0.329-7.590
平均值	0.91	0.78	0.88	1.41	0.91	0.44	1.56
5-10cm	0.237-3.217	0.185-3.838	0.193-3.776	0.292-5.016	0.084-19.940	0.032-5.129	0.333-5.555
平均值	0.92	0.71	0.78	1.08	0.52	0.39	1.63
10-20cm	0.262-2.078	0.150-2.781	0.222-2.046	0.320-54.262	0.077-8.074	0.048-6.274	0.241-3.781
平均值	0.95	0.63	0.74	1.61	0.45	0.35	1.28
0-20cm	0.93	0.71	0.80	1.37	0.63	0.39	1.49

### 2.4 聚类权 $\eta_{jk}$ 的确定

聚类权是衡量各个聚类指标  $j$  对同一灰类  $k$  的权重,聚类权的大小反映出各聚类指标对不同灰类的密切程度,即各污染物对不同类别沉积物环境质量的贡献或影响大小<sup>[11]</sup>.灰色聚类分析中,聚类权确定的依据是环境质量分级标准,各金属在沉积物环境质量不同等级中的聚类权  $\eta_{jk}$  计算结果见表7.

表7 各金属在沉积物环境质量不同等级中的聚类权  $\eta_{jk}$   
Tab.7 Clustering weight of metals in sediment quality grades

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Hg	As
I类	0.1228	0.1474	0.1544	0.1965	0.1158	0.1018	0.1614
II类	0.1362	0.1443	0.1463	0.1585	0.1341	0.1321	0.1484
III类	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
IV类	0.1466	0.1422	0.1411	0.1345	0.1466	0.1488	0.1400
V类	0.1480	0.1417	0.1399	0.1291	0.1498	0.1534	0.1381

灰色聚类分析中, 各因子的“重要性”隐含在其分级标准中, 因而同一因子在不同级别和不同因子在同一级别中的权重都有可能不同. 各金属在沉积物环境质量不同等级中的聚类权  $\eta_{jk}$  分配见图 3. 各金属聚类权  $\eta_{jk}$  均在 0.10–0.20 之间, 除 I 类外, 其它各类沉积物环境质量等级中各金属的聚类权  $\eta_{jk}$  分配比较均衡, 特别是 III 类沉积物中, 各金属的聚类权  $\eta_{jk}$  相等. 灰色聚类分析以环境质量分级标准确定聚类权  $\eta_{jk}$ , 污染因子在分级标准中的指标值越高, 则说明其毒性和对环境质量的影响越小, 其所占权重就越小; 反之则越大.

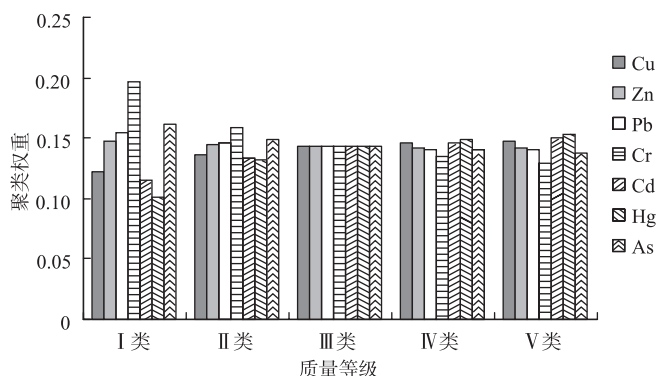


图 3 各金属在沉积物环境质量不同等级中的聚类权  $\eta_{jk}$  分配  
 Fig.3 Distributions of the clustering weight in sediment quality grades

在分级标准确定后, 各因子的权重是不变的, 因而在很大程度上避免了主观随意性, 使评价结果更可靠, 更具可比性<sup>[12]</sup>. 但是, 由于没有充分考虑特定沉积物主要污染因子的作用, 因而一些情况下会导致聚类权  $\eta_{jk}$  出现“平均化”倾向.

2.5 各样点所属沉积物环境质量类别

按照最大隶属原则, 分别判别出各采样点所属沉积物环境质量类别, 把属于同一类别的样点再进行归类, 就可对沉积物环境质量状况做出整体评价. 滇池沉积物环境质量的灰色聚类分析结果见表 8. 由于样品在运输、储存和消化过程中的损失, 不同沉积物层次进行聚类分析的样品数不相等.

从各采样点灰色聚类分析结果看, 滇池沉积物 0–5cm 和 5–10cm 以属于 III 类沉积物的样点数量最多, 沉积物环境质量均为 III 类; 10–20cm 以 II 类沉积物样点最多, 为 II 类沉积物. 以 0–20cm 各金属平均含量进行灰色聚类分析, 属于 III 类沉积物的样点数量最多, 因此滇池沉积物环境质量整体上属于 III 类, 即中度金属污染. 属于不同沉积物环境质量类别的样点在各层沉积物中的分布见图 4.

从图 4 可以看出, 随着沉积物深度的减小, 属于 I 类和 II 类沉积物的样点数量减少, III 类沉积物样点有所增加, 但变化不明显, 而 IV 类和 V 类沉积物样点则有明显增加, 表明滇池沉积物环境质量表层劣于下层, 即滇池沉积物金属污染存在不断加剧的趋势.

表 8 滇池沉积物环境质量的灰色聚类分析结果

Tab.8 Grey clustering results of Lake Dianchi sediment quality

	样点数	I	II	III	IV	V	评价结果
0–5cm	116	18	21	35	31	11	III 类
5–10cm	113	23	27	31	25	7	III 类
10–20cm	121	26	37	34	20	4	II 类
0–20cm 平均	109	18	29	32	26	4	III 类

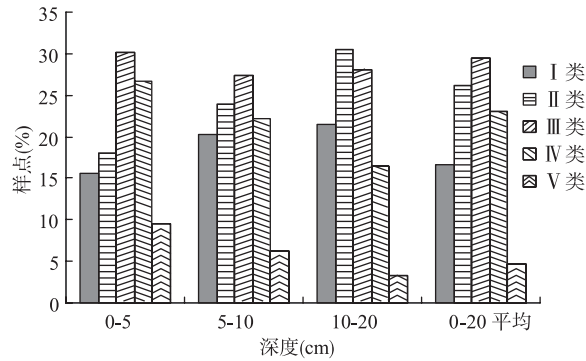


图 4 不同环境质量类别样点在滇池各层沉积物中的分布

Fig.4 Distribution of the samples in different sediment layers and sediment quality grades in Lake Dianchi

## 2.6 讨论

(1) 由于基于多方的基准(CBSQGs)建立在多种基准的基础上<sup>[6]</sup>, 避免了各金属基准值的过高或过低, 即对底栖生物过度保护或保护不足的问题, 评价结果的可靠性得以提高, 因而具有较广的代表性. 但同其它基于生物效应的沉积物环境质量基准一样, CBSQGs 也是基于各单一金属的生物效应, 没有考虑沉积物中多种金属的共同(加和)作用, 也没有考虑特定沉积物理化性质(pH、Eh、细颗粒物、酸可挥发性硫化物 AVS、有机碳 TOC 等)对金属生物有效性的影响<sup>[13-16]</sup>.

(2) 灰色聚类法充分考虑了环境系统的灰色性和白化程度, 较好地处理了环境质量等级界线间的模糊性, 灰类的白化权函数并不局限于在相邻等级间将边界模糊化, 而是表示关于等级的信息覆盖, 信息利用率和分辨精度均有较大幅度提高. 同时, 灰色聚类法权重的确定依据是环境质量分级标准, 权重隐含在各类分级标准中, 分级标准确定后, 各因子的权重是不变的, 因而在很大程度上避免了主观随意性, 因此, 灰色聚类法是进行环境质量评价的有效方法, 可用于沉积物的环境质量综合评价.

(3) 对于较大面积的湖泊, 沉积物中各污染物的含量分布往往存在较大的空间差异(图 2), 因此采样点的数量和位置直接影响到沉积物环境质量评价的结果, 较高密度和均匀布置采样点对于提高评价结果的精度和可靠性十分重要. 滇池沉积物中各污染物的高值区多出现在草海和海外海南部(图 2), 在对沉积物进行整体环境质量评价的基础上, 根据不同区域沉积物的污染程度, 划分和确定不同区域沉积物的环境质量等级, 有助于更准确地揭示滇池沉积物的环境质量状况.

## 3 结论

(1) 用基于多方的基准(CBSQGs)中阈值效应含量 TEC 和可能效应含量 PEC 划分沉积物环境质量等级是可行的, 不同环境质量等级反映了金属污染物产生生物毒性的概率. 由于 CBSQGs 基于金属污染物的生物效应数据, 能够对底栖生物提供较为可靠的保护.

(2) 滇池沉积物(0-20cm)环境质量整体上为 III 类沉积物, 即发生了中度金属污染. 其中 0-5cm 和 5-10cm 均为 III 类沉积物, 中度金属污染; 10-20cm 为 II 类沉积物, 轻度金属污染. 沉积物环境质量下层优于上层, 即滇池沉积物金属污染仍存在不断加剧的趋势.

## 4 参考文献

- [1] Burton GA Jr. Sediment quality criteria in use around the world. *The Japanese Society of Limnology*, 2002, 3: 65-75.
- [2] Gaudet CL, Keenleyside KA, Kent RA *et al.* How should numerical criteria be used? The Canadian approach. *Human and Ecological Risk Assessment*, 1995, 1(1): 19-28.
- [3] Smith SL, MacDonald DD, Keenleyside KA *et al.* A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, 22: 624-638.

- [4] Birch GF, Taylor SE. Application of sediment quality guidelines in the assessment and management of contaminated surficial sediments in Port Jackson (Sydney Harbour), Australia. *Environmental Management*, 2002, **29**(6): 860-870.
- [5] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究. *环境科学学报*, 1999, **19**(3): 230-235.
- [6] 陈云增, 杨浩, 张振克等. 淡水沉积物环境质量基准差异分析. *湖泊科学*, 2005, **17**(3): 193-201.
- [7] Swartz RC. Consensus sediment quality guidelines for PAH mixtures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, **18**: 780-787.
- [8] MacDonald DD, Ingersoll CG, Berger TA. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Arch Environmental Toxicology*, 2000, **39**: 20-31.
- [9] 李仁英. 滇池主要重金属含量的时空分布及其污染特征[博士学位论文]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2005.
- [10] Chen Yunzeng, Yang Hao, Zhang Zhenke *et al.* Application of equilibrium partitioning approach to the derivation of sediment quality guidelines for metals in Dianchi Lake. *Pedosphere*, 2007, **17**(3): 284-297.
- [11] 傅立. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- [12] 慕金波, 侯克复. 灰色聚类法在水环境质量评价中的应用. *环境科学*, 2000, **12**(2): 86-89.
- [13] Chapman PM, Wang F, Adams WJ *et al.* Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(22): 3937-3941.
- [14] Annkley GT. Evaluation of metal/acid volatile sulfide relationships in the predication of metal bioaccumulation by benthic macro invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, **15**: 2138-2146.
- [15] Hyland JL, Balthis WL, Hackney CT *et al.* Sediment quality in North Carolina estuaries: An integrative assessment of sediment contamination, toxicity, and condition of benthic infauna. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress & Recovery*, 2000, **8**: 107-124.
- [16] Landrum PF. How should numerical sediment quality criteria be used? *Human and Ecological Risk Assessment*, 1995, **1**: 13-17.