

调整 AHP 法结合¹³⁷Cs 计年评价滇池沉积物综合质量

张燕^{1,2}, 邓西海², 彭补拙¹

(1. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 评价沉积物综合质量及了解其演变情况时, 常会受困于缺乏监测数据尤其是历史数据, 将¹³⁷Cs 计年法与一般的取样测试相配合, 可以较方便地解决此问题. 确定加权环境质量综合指数的权值时采用了调整的层次分析法(AHP法), 调整主要针对 AHP 法的两两比较环节, 使得仅需依据对监测数据的运算便可完成各因子相对重要性的两两比较并构造判断矩阵, 以克服应用 AHP 法时存在于此环节的主观随意性. 据此计算了滇池各湖区沉积物的质量综合指数, 各湖区沉积物的综合质量均呈现随时间延续污染加重, 这可能与滇池流域的工业发展与布局有关, 因此, 有必要将控制工业排放与其它治理措施结合, 以改善滇池沉积物的质量, 防止沉积物中的重金属成为二次污染源.

关键词: ¹³⁷Cs 计年; 调整 AHP 法; 综合评价; 沉积物; 滇池

中图分类号: X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1531-06

Evaluating Comprehensive Quality of Sediment in Dianchi Lake Using Adjusted AHP Method and ¹³⁷Cs Dating

ZHANG Yan^{1,2}, DENG Xi-hai², PENG Bu-zhuo¹

(1. Department of Urban and Resources Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: It is difficult to evaluate comprehensive quality of sediment and to understand development trend of pollution because of absence of monitoring data, especially history data. Combining the method of ¹³⁷Cs dating with the ways of general sampling and measurement can easily resolve the problem of absence of data and also provide the possibility for calculating weighted environmental quality comprehensive index using the adjusted analytical hierarchy process (AHP) method. In order to overcome the willfulness the judgment matrix is formed objectively based on calculating monitoring data. Based on the monitoring data of sediment pollution and the weights of various factors gained by adjusted AHP method the comprehensive quality of sediment in each zone of Dianchi Lake was evaluated and the results indicated that the pollution of sediments in each zone at the present be serious more than that in the history. The condition may be related to the industrial development and distribution of industries in Dianchi Lake basin. Therefore, in order to improve the comprehensive quality of sediment in Dianchi Lake and to prevent the secondary pollution of heavy metals in sediment from happening, it is necessary to control the pollutants discharge and to remove the pollutants with various ways.

Key words: ¹³⁷Cs dating; adjusted AHP method; environmental quality comprehensive evaluation; sediment; Dianchi Lake

为了解环境整体状况并便于对不同时段和不同区域环境的总体质量进行对比, 有必要进行环境质量综合评价, 对湖泊沉积物污染状况的综合评价便是环保部门在环境质量报告书中通常要予公布的信息. 实际应用中多选择经算术平均或加权平均计算的综合指数衡量环境综合质量^[1,2], 不过, 加权计算中常用赋权方法或者主要依赖分析者的主观认识, 如德尔菲法^[3], 或者虽总体客观但也掺入一定的主观标准, 如 AHP 法^[4]; 此外, 常用方法多是静态处理问题, 表现为权值一旦确定便以之评价不同时段的环境质量, 而现实中环境因子的量值却经常在变, 它们的相对影响当然亦随时间变化, 用相同权值进行不同时段的评价虽简单却不够合理.

笔者认为, 计算环境质量综合指数时, 加权平均比算术平均合理, 并应尽可能依实测数据客观地赋

予各参评因子一定的权值; 各因子的权值还应随客观情况相应改变, 只是此种改变仍以实测数据的变动为依据, 且各时段和各区域的权值赋予方法保持一致. 为此, 需对赋权时常用的层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)中的两两比较赋值程序进行调整来满足上述要求. 具体调整为: 设计了 2 个排序参数以处理实测数据, 并据它们的组合作出参评因子相对贡献排序; 依排序位次对其赋值, 再以对所赋之值的运算为据进行 AHP 法规定的两两比较构造判断矩阵, 并由此算得各因子的权值; 如果不同时段或不同区域实测值发生变动, 使用同样

收稿日期: 2005-09-15; 修订日期: 2005-10-25

基金项目: 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重点项目(5022505)

作者简介: 张燕(1962~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源与环境科学, E-mail: zhangynju@yahoo.com.cn

方法对各因子重新排序,按位次变动赋予对应的权值。

利用这样调整过的 AHP 法计算综合指数的权值,需具备的一个基本条件是有 2 个以上时段参评因子的监测值。但测试沉积物中元素却是一项比较麻烦的工作,其中采样和样品处理尤为不便,更因很长时间内并未将此作为环境监测的必需内容,因而很多地方缺少过去几十年的监测数据,使得不易用此方法评价历史时期的环境综合质量。 ^{137}Cs 计年法则具有简便、快速、花费较少的特点,一次取样就可方便地获取过去 50 a 以来若干时段的沉积数据,因此,很适宜与本文提出的方法配合。虽无法以此开展沉积物的逐年评价,却能对过去一段时期的平均状况做出评价,这样有助于掌握沉积物元素负荷的长期综合变化趋势。

近年来滇池污染日趋严重,但缺少不同时期沉积物中重金属的沉积资料使得对沉积物的综合评价及污染负荷的长期综合变化研究不易开展。在本文中,利用多点采样和 ^{137}Cs 计年及测量沉积物重金属含量并辅以 GIS 手段获取所需测试数据,再以此为基础,采用经调整的 AHP 法计算权值,多种方法并用,测算了 50 a 来几个时段滇池不同区域沉积物的综合指数,以了解滇池不同区域沉积物综合质量的历史和总体演变情况,并对滇池不同区域的沉积物综合质量做了对比。

1 材料与方法

1.1 ^{137}Cs 计年原理

大气 ^{137}Cs 沉降至湖泊中便被沉积物强烈吸附,故 ^{137}Cs 沉降量随时间变化的信息可保存于沉积序列中^[5,6],即沉积物各层 ^{137}Cs 含量反映了各层沉积时的大气 ^{137}Cs 沉降量。许多地区都有大气 ^{137}Cs 沉降时间分布的记载,可用与之对应的沉积物中 ^{137}Cs 的一些标志层(淀积峰位置)作为计年时标^[7,8]:沉积物中含 ^{137}Cs 最深层的时间对应 1954 年,最大 ^{137}Cs 值所在层对应 ^{137}Cs 沉降的峰值年(1963 年),受切尔诺贝利核事故影响地区的沉积物中会出现另一标志层(1986 年),顶层沉积物则对应采样年。局部地区沉积物中还存在若干其它标志层,可根据各地具体情况和需要作为辅助计年时标。

得到与一定深度对应的时标 T 后,便可确定与起止年份时标 T_1 、 T_2 (a) 对应的实际厚度 ΔH 。再测量某种元素在 ΔH 区间的平均浓度 c_i (mg/kg),也就知道了该元素在 $T_1 \sim T_2$ 时段的平均浓度。

1.2 确定权重的方法

1.2.1 环境综合质量评价方法

加权平均环境质量综合指数 P 常被用来评价环境综合质量。

$$P = \sum W_i \times P_i$$

其中:

$$P_i = \sum c_i / c_{is}, \quad \sum W_i = 1$$

式中 W_i 为权重; P_i 、 c_i 、 c_{is} 分别为第 i 种参评因子分指数、实测值、环境质量标准值或背景值。

利用上式时,测定了诸因子的浓度,又选定了对应的环境质量标准值,确定权重便成为最重要的工作。为避免定权中的主观随意性,设计了下述方法以尽可能客观地确定权重值。

1.2.2 参评因子的动态排序

首先,设计了 2 个排序参数,并用它们对因子所处状态进行动态分类。

一个排序参数为相对超标量 y_{i1} ($y_{i1} = \Delta c_{i1} / c_{is} = [c_i(t) - c_{is}] / c_{is}$),表示第 i 种因子背离标准值的相对量,环境意义为 i 因子的环境容量的相对剩余量。 $y_{i1} \leq 0$,说明 i 因子还未超标,环境对之还有一定的容纳能力或刚达到环境的容纳限度,因而尚未构成现实污染危害; $y_{i1} > 0$,说明 i 因子超出环境质量标准,污染负荷大于环境容量,即该因子超出了环境容纳能力,已构成现实环境污染。

另一排序参数是相对变化量 y_{i2} ($y_{i2} = [c_i(t) - c_i(T_0)] / c_i(T_0)$),表示环境中第 i 种因子在 $T_0 \sim t$ 年期间的相对变化量。受自然条件、污染源排放强度以及污染治理水平等影响,各参评因子的环境浓度随时在变动, $y_{i2} \leq 0$,说明 $T_0 \sim t$ 年期间 i 因子的浓度在减少或保持不变,环境污染程度正减轻; $y_{i2} > 0$,说明 i 因子的浓度在 $T_0 \sim t$ 年期间是增加的,将导致环境污染程度加剧。

y_{i1} 、 y_{i2} 的符号和大小可反映因子对环境污染的贡献,它们的不同组合代表因子处于不同状态,因此,根据 y_{i1} 和 y_{i2} 的不同组合将因子所处状态定为 4 类: ① $y_{i1} > 0$, $y_{i2} > 0$; ② $y_{i1} > 0$, $y_{i2} \leq 0$; ③ $y_{i1} \leq 0$, $y_{i2} > 0$; ④ $y_{i1} \leq 0$, $y_{i2} \leq 0$ 。状态 ① 表示环境污染不仅已现实存在且在加剧,处于该状态的因子是环境监测、防治中应特别关注的关键因子,防治时须加大控制力度予以扼制; ② 表示污染虽已存在但程度趋于减轻,处于此状态的因子有必要维持现行控制措施使其不断趋于好转,或加大控制治理强度加速其好转; ③ 表示虽污染还未发生但污染的可能性在加大,

处于状态③的因子是应予警惕的预警因子, 亦应采取控制措施并扭转其发展进程; ④表示污染不仅未发生且发生的可能性还在减小, 对此类因子不必特别关心, 只要不对当前控制方式做大的改变即可。

如此分类, 不仅从质量标准角度考虑了因子在当前环境中的处境, 还从时间角度考虑了因子数值变化对其所处状态的影响, 是一种动态分类。

其次, 根据所处状态的差异, 对参评因子进行动态排序。

先根据 y_{i1} 和 y_{i2} 的符号组合对各因子进行第 1 次排序, 并认为其排序位次由大至小的顺序为: 状态① 状态② 状态③ 状态④ 假如在第 1 次排序中存在若干因子处于同一位次, 则需对它们进行 2 次排序, 优先选择 y_{i1} , 按其数值由大至小进行, 若仍不能区分相对位次, 再依据 y_{i2} 的数值由大至小进行排序。这样处理后, 便可排定各因子的位次。这是 1 种动态排序。

依序就易定性了解各因子在环境中的相对重要性, 即位次靠前的因子对环境总体污染的贡献大于在后的因子, 综合评价时要赋予这些因子较大权重。为定量确定权重的数值, 可在排序基础上应用人们较多采用的 AHP 定权法。

1.2.3 参评因子相对权重的确定

AHP 法是据对客观现实的判断, 经两两因素比较构造每一层次的相对重要性矩阵, 再用数学方法确定每一层次各元素的相对权重。但因判别标准由操作人员自行掌握, 故两两因素相对重要性比较时, 不同人员对相同因素进行的比较, 就很可能因掌握标准不同而使比较结果有较大差异, 造成在因子与原始数据完全一样的前提下也会出现得出的权值因人而异的现象。

要减少人为造成的不确定性, 可根据参评因子的排序来构造判断矩阵, 并由此确定各因子的权重, 具体步骤为: 按参评因子贡献从大至小排序的位次赋予连续奇数值 $M_n, \dots, M_2, M_1$, 个别因子的最终排序位次相同则赋予它们相等的值; 再比较参评因子的赋值即计算 $M_{ij} = M_i / M_j$ 以构造判断矩阵; 然后, 由判断矩阵计算各因子的优先级特征矢量即各因子的权值 W_i ; 最后进行一致性检验, 若检验通过, 说明构造判断矩阵的数值合理, 由其计算出的各因子的权值也就相对合理。

1.2.4 不同时段或不同区域参评因子权重的调整

受排放种类、排放总量、治理效率及环境容量等诸多因素影响, 不同时段或不同区域环境中各污

染因子的浓度分布存在差异, 即各因子对环境污染的贡献随时间和地点而不同。为客观反映各因子对环境质量的影响, 评价环境综合质量时, 权重应随因子的贡献作相应变动。

由上述介绍可知, 参评因子的权重取决于排序位次, 因此, 评价不同时段或不同区域的环境综合质量时, 权重是否需要改变便取决于因子的相对排序位次是否改变。现实中, 各因子的数值通常随时间和地点变化, 且变化率一般不同步, 因而反映它们相对贡献大小的排序常常也会发生改变。只要能确定各时段或各区域参评因子对环境污染贡献的位次, 由 1.2.3 节所述同样的步骤就可确定不同时段或不同区域各参评因子的权重。

1.3 滇池概况及分区

滇池 ($24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02' N$, $102^{\circ}36' \sim 102^{\circ}47' E$) (图 1) 面积 298 km^2 , 最大水深 10m, 湖底坡度 $1.65\% \sim 2.48\%$, 换水周期 981d; 因受断陷盆地控制, 滇池呈南北长东西窄的弓弦形, 北部有一天然堤 (海埂) 将其分成 2 个水域, 堤北称草海, 堤南称外海; 西岸紧临西山断崖, 湖岸陡峭, 南北端及东岸由三角洲、台地、岗地、丘陵、中低山构成; 盘龙江等多条源近流短的河流呈向心状注入湖区, 湖水经螳螂川出湖^[9]。

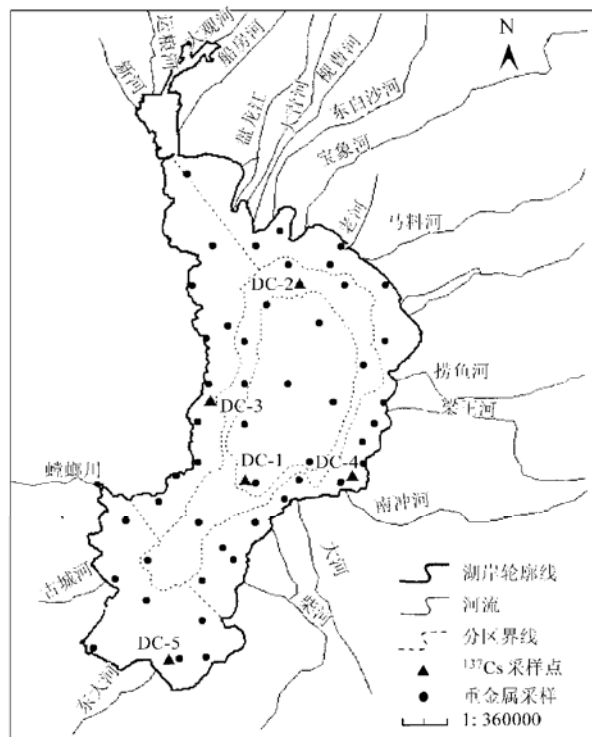


图 1 采样点分布及滇池沉积分区图

Fig. 1 Sampling sites and distribution boundary of sediment accumulation of Dianchi Lake

为更准确了解不同区域沉积物的环境综合质量,根据等深线、沉积物粒度、湖底坡度、湖岸地貌、入湖河流分布和流域土壤侵蚀状况,以水下地形图作底图,用 Arcmap 绘制界线将滇池划分成若干区域(图 1).尽管划区指标间并不完全统一,但仍能区分不同区域的沉积特点.

滇池底泥沉积相大致呈环状^[9],故先以等深线为界确定湖心区,另以深度大于 5.0m 区域作为远岸湖心区(I),4.5~5.0m 深度间区域作为近岸湖心区(II),湖心区湖底平坦,坡度仅 0.15%~0.17%,沉积物为含粉砂粘土及粘土.4.5m 等深线以西、北部湖心中线以南、螳螂川以北为湖西区(III),该区湖水紧逼山麓,湖岸陡(普渡河-西山正断层断面以 40°~70°角倾向滇池,断层西盘(上升盘)西山、大青山被抬升到距目前湖面 560m^[10]),巨大高差的地貌条件、山麓重力堆积及季节性溪流提供了大量粗碎屑物源入湖,沉积物为含砂、粉沙、细沙质粘土.4.5m 等深线和北部湖心中线以东、柴河三角洲南界以北区域为湖东区(IV),该区东岸地形平缓,有零星残山断崖,沿岸有堤坝,流域侵蚀泥沙经盘龙江、梁王河、柴河等流量大入湖泥沙量高的河流携带入湖,沉积物为粘土质粉沙.柴河三角洲南界、4.5m 等深线及螳螂川以南为湖南区(V),相比滇池中,该区湖面收缩深度变浅,东大河从南方入湖,湖泊唯一的出口从该区西岸古城河以北出湖,沉积物为粉砂质粘土.草海经过疏浚,沉积状况已发生很大变化,难与外海比较,不再对之讨论.

1.4 样品采集与测试

2003-06 在滇池用均匀布点法结合 GPS 定位及 1:50 000 地形图校正进行系统采样,工具为奥地利产内径 6cm 聚丙烯筒式原状沉积物取样器.采得沉积物柱芯长 35~50cm,悬浮层未受扰动,界面水清澈.采样后,测试沉积物重金属含量的柱芯按 0~5 cm 5~10 cm 和 10~20 cm 间距分割,测定 ¹³⁷Cs 含量的定年样点 DC-1~DC-5(分别代表 I~V 区域)柱芯按 1cm 间距截分.

对经风干、研磨、过 100 目筛、105℃下烘至恒重的沉积物样品,采用 HCl-HNO₃-HF 微波消解方法^[11]和美国热电公司生产的 ICP-MS(Poems II)仪器测量 Cu、Cd、Cr、Pb、Zn、Co、Ni 等元素,As、Hg 则用 HG-AFS 原子荧光光谱仪测定.对标准土壤样品(GSS1~GSS8)中重金属的定值测定及至少 3 个样品的平行测量表明测量误差小于 GSS 国标允许误差.

经风干、研磨、过 60 目筛、105℃下烘至恒重,称取 10g 样品测定 ¹³⁷Cs 含量.测试仪器为美国 PerkinElmer Instruments 公司生产的高纯锗探测器(GEM 35P)、数字化 γ 谱仪(DSPEC-CH)及多道分析系统(MAESTRO-32).γ 谱仪分辨率 1.68keV,峰-康比 69:1, ⁶⁰Co 1.33MeV 处的 γ 相对探测效率为 37%.标准样由国防科学技术工业委员会放射性计量一级站提供,标样容器与待测样品容器形状及大小一致.测量时长 86 400s,分析精度在 90% 置信水平为 ±10%.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中 ¹³⁷Cs 测量值和重金属浓度分布

滇池沉积物中的 ¹³⁷Cs 测量值和 ¹³⁷Cs 时标见表 1.沉积物参评因子分别是 Cu、Cd、Cr、Pb、Hg、Zn、As、Co、Ni,滇池各湖区不同时段沉积物中各因子的实测平均值见表 2.

表 1 各湖区各层沉积物的 ¹³⁷Cs 含量¹⁾/Bq·kg⁻¹

Table 1 Vertical distribution of ¹³⁷Cs activity in sediments of Dianchi Lake/Bq·kg⁻¹

深度/cm	DC-1	DC-2	DC-3	DC-4	DC-5
0~1	3.61 ^d	4.88 ^d	4.04 ^d	3.79 ^d	3.48 ^d
1~2	6.34	6.70	6.78	4.05	5.72
2~3	13.77 ^c	5.58	7.50	3.12	6.96
3~4	10.96	8.07	7.92	5.97	7.10
4~5	15.88	8.76	8.54	8.44	10.98 ^e
5~6	15.08	10.19 ^e	9.86 ^c	10.86 ^c	8.73
6~7	15.58	9.16	7.92	9.75	9.38
7~8	16.46 ^b	8.96	9.35	7.92	11.52
8~9	10.69	8.85	11.60	11.60	10.06
9~10	6.87	9.63	8.38	10.14	10.64
10~11	5.28	5.28	11.35	7.59	12.31 ^b
11~12	3.67 ^a	7.96	10.84	11.34 ^b	8.30
12~13	0.00	9.52	11.86	5.16	5.29
13~14		12.84 ^b	13.57 ^b	3.30	2.50 ^a
14~15		9.20	8.52	2.54 ^a	0.00
15~16		7.56	6.42	0.00	
16~17		6.80	5.45		
17~18		2.28 ^a	4.20 ^a		
18~19		0.00	0.00		

1) a b c d 分别表示该深度对应的年份为 1954、1963、1986、2003 年

从垂直方向(即时间过程)看,多数区域沉积物中 Cu、Cr、Co、Ni 浓度随深度增加,表层(近期)低;Cd、Hg、Zn 浓度随深度降低,表层高,只有少数例外;Pb、As 浓度则无明显的变化规律.

从各湖区看,滇池流域的工业布局对各湖区有较大影响.湖西区受观音山磷矿区影响,湖南区位于昆阳、晋宁磷矿开采区下游,采矿、选矿、金属冶炼加工及化肥生产导致区域污染日益加重,使两湖区各时段都出现 Cd、Pb、Hg、Zn 高值;湖心区是 Cd、As、

Cr 的高值区域,可能是由于其位于湖水向西流动排水的区域,沉积物中又有较高含量的粘粒吸附了大量重金属元素^[9].

2.2 滇池沉积物评价

表 2 滇池各湖区沉积物中各元素平均浓度及土壤背景值¹⁾/mg•kg⁻¹

Table 2 Mean concentration of various elements in sediment of Dianchi Lake and in soil background /mg•kg⁻¹

湖区	年代	对应深度/cm	Cu	Cr	Cd	Pb	Hg	Zn	As	Co	Ni
I	<i>T_a</i>	9~ 12	90.70	83.10	0.64	52.50	0.16	156.04	35.24	20.20	39.95
	<i>T_b</i>	4~ 8	83.62	75.04	0.94	56.29	0.18	166.34	40.39	21.25	41.75
	<i>T_c</i>	0~ 3	78.70	73.18	1.17	59.16	0.18	169.66	37.41	24.30	46.83
II	<i>T_a</i>	15~ 18	91.69	90.77	0.60	54.72	0.15	151.44	27.12	22.61	43.10
	<i>T_b</i>	7~ 14	89.46	86.02	0.70	56.46	0.16	163.55	32.08	24.76	47.38
	<i>T_c</i>	0~ 6	83.27	82.12	0.90	64.24	0.18	189.60	33.04	26.30	50.05
III	<i>T_a</i>	15~ 18	86.27	93.36	0.59	65.18	0.27	182.14	35.81	20.95	42.10
	<i>T_b</i>	7~ 14	81.16	83.75	0.85	61.84	0.26	198.08	37.02	22.37	46.67
	<i>T_c</i>	0~ 6	76.25	78.20	1.05	63.64	0.26	205.25	33.80	24.60	52.59
IV	<i>T_a</i>	13~ 15	86.83	86.65	0.45	51.55	0.13	139.15	21.41	23.77	40.28
	<i>T_b</i>	7~ 12	81.69	81.11	0.56	50.69	0.14	156.83	25.30	26.84	45.63
	<i>T_c</i>	0~ 6	71.63	74.21	0.77	50.75	0.14	159.07	27.76	28.33	48.97
V	<i>T_a</i>	12~ 14	67.14	108.94	0.81	105.01	0.22	191.09	25.69	15.96	38.79
	<i>T_b</i>	6~ 11	68.16	92.24	0.71	99.41	0.23	175.09	30.43	18.02	43.67
	<i>T_c</i>	0~ 5	73.33	85.84	1.18	113.98	0.24	208.31	27.37	20.31	50.37
背景值			46.30	65.20	0.218	40.60	0.058	89.70	18.4	17.50	42.50

1) *T_a*、*T_b*、*T_c* 分别表示时段 1954~ 1963、1963~ 1986、1986~ 2003 年. 背景值用云南表层土壤算术平均值^[12]

沉积物暂无统一的国家标准,用云南省土壤背景值作参考标准.以 1954~ 1963 时段为参考时段,计算各因子的 y_{i1} 和 y_{i2} ,按前述方法对各因子进行一次和二次排序,并得到 1963~ 1986 时段和 1986~ 2003 时段各因子的总排序(表 3);再与各因子排序位次相对应分别赋予由大至小不等的数值 17, 15, 13, ..., 1,然后两两比较因子的赋值构造判断矩阵(表 4);由判断矩阵计算总排序位次从 1 至 9 各因子的权值如表 3.判断矩阵能通过一致性检验,说明各因子的权值合理.

除部分时段的 Ni、Co 未超出背景值,各期(各层)沉积物中重金属浓度全部超过, Cd 和 Hg 分别超出背景值最高达 5.4 和 4.7 倍,超值排序为 Cd> Hg> Zn> As> Pb> Cu> Cr> Co> Ni.

Cr、Co 和 Ni 在各区域各时段的相对变化量 (y_{i2}) 均小于 0,说明 1954~ 2003 年期间它们的浓度在减少,污染程度减轻,减少最快的因子是 Ni,其次是 Cr,除湖南区外, Cu 在其余各区也表现为污染减轻; Cd、Hg、Zn 在多数湖区及时段的 y_{i2} 大于 0,排序为 Cd> Zn> Hg,说明 1963~ 2003 年期间它们的浓度在增加,致使污染程度加剧, Cd 浓度增加最快,它的 y_{i2} 在 1986~ 2003 时段比 1963~ 1986 时段增加 0.66; Pb、As 的 y_{i2} 时增时减.随着近年加大磷矿开采及磷肥生产的力度,湖南区除 As、Co、Ni 的 y_{i2} 不

变或略有减少外,其余元素的 y_{i2} 均增加,尤其 Cd 增加最明显.

除 II 和 IV 区在 2 个时段各因子的权相同外,其余区域各因子的权均因排序位次变化而不同,表明因子的相对影响确实随时间发生改变.

1986~ 2003 时段和 1963~ 1986 时段滇池沉积物加权平均综合指数见表 3,由表可见,各湖区沉积物的污染状况 1986~ 2003 时段比 1963~ 1986 时段均有不同程度增加,增加最快的区域是湖南区,其次是远岸湖心区,最轻的是湖东区.

3 结论

(1) 评价沉积物的环境综合质量,首先要获得参评因子的监测数据,借助 ¹³⁷Cs 计年法可以方便地经一次采样就得到不同时段沉积物的监测数据,且得到的是几十年长期平均数据,可借此了解参评因子的长期变动趋势,尤其对缺少历史数据的研究对象,此种收集数据的方法更具特有的优点.

(2) 按加权平均计算综合指数时, AHP 法是多种确定权重方法中应用较广的一种,该法使用中的一个必不可少的步骤是经参评因子相对重要性的两两比较来构造一个判断矩阵,此时因各人掌握的判断标准有别,常使比较结果有很大的不同.对两两比较环节所做调整使得比较不再是一个主观判断行为,

表 3 滇池各湖区沉积物中污染因子总排序 权重及综合指数

Table 3 Seating order of pollution factors, weight and comprehensive index in sediment of Dianchi Lake

日期	元素	湖区 I		湖区 II		湖区 III		湖区 IV		湖区 V	
		排序	权重	排序	权重	排序	权重	排序	权重	排序	权重
1986~ 2003	Cu	6	0.090 2	6	0.090 2	6	0.090 2	5	0.113 1	5	0.113 1
	Cr	8	0.042 1	8	0.042 1	8	0.042 1	8	0.042 1	7	0.066 6
	Cd	1	0.200 4	1	0.200 4	1	0.200 4	1	0.200 4	1	0.200 4
	Pb	4	0.135 5	5	0.113 1	3	0.157 4	7	0.066 6	3	0.157 4
	Hg	2	0.179 1	2	0.179 1	4	0.135 5	4	0.135 5	2	0.179 1
	Zn	3	0.157 4	3	0.157 4	2	0.179 1	2	0.179 1	4	0.135 5
	As	5	0.113 1	4	0.135 5	5	0.113 1	3	0.157 4	6	0.090 2
	Co	7	0.066 6	7	0.066 6	7	0.066 6	6	0.090 2	8	0.042 1
	Ni	9	0.015 7	9	0.015 7	9	0.015 7	9	0.015 7	9	0.015 7
综合指数		2.66		2.46		2.72		2.02		3.04	
1963~ 1986	Cu	6	0.090 2	6	0.090 2	5	0.11	5	0.113 1	3	0.157 4
	Cr	8	0.042 1	8	0.042 1	8	0.04	8	0.042 1	7	0.066 6
	Cd	1	0.200 4	1	0.200 4	1	0.20	1	0.200 4	4	0.135 5
	Pb	5	0.113 1	5	0.113 1	6	0.09	7	0.066 6	5	0.113 1
	Hg	2	0.179 1	2	0.179 1	4	0.14	2	0.179 1	1	0.200 4
	Zn	4	0.135 5	3	0.157 4	2	0.18	3	0.157 4	6	0.090 2
	As	3	0.157 4	4	0.135 5	3	0.16	4	0.135 5	2	0.179 1
	Co	7	0.066 6	7	0.066 6	7	0.07	6	0.090 2	8	0.042 1
	Ni	9	0.015 7	9	0.015 7	9	0.02	9	0.015 7	9	0.015 7
综合指数		2.47		2.18		2.58		1.90		2.36	

表 4 1986~ 2003 时段滇池 I 区沉积物的判断矩阵

Table 4 Pairwise comparison matrix of sediment of Dianchi Lake (I) in period of 1986~ 2003

元素	Cu	Cr	Cd	Pb	Hg	Zn	As	Co	Ni
Cu	1	7/3	7/17	7/11	7/15	7/13	7/9	7/5	7
Cr	3/7	1	3/17	3/11	3/15	3/13	3/9	3/5	3
Cd	17/7	17/3	1	17/11	17/15	17/13	17/9	17/5	17
Pb	11/7	11/3	11/17	1	11/15	11/13	11/9	11/5	11
Hg	15/7	15/3	15/17	15/11	1	15/13	15/9	15/5	15
Zn	13/7	13/3	13/17	13/11	13/15	1	13/9	13/5	13
As	9/7	9/3	9/17	9/11	9/15	9/13	1	9/5	9
Co	5/7	5/3	5/17	5/11	5/15	5/13	5/9	1	5
Ni	1/7	1/3	1/17	1/11	1/15	1/13	1/9	1/5	1

而仅需依据原始监测数据进行数值运算即可,这就使定权过程完全建立在客观的监测数据基础上.由于数据处理步骤比较程式化,因此所得结果也就具有唯一性而不再因人而异了.

(3)与云南陆地表层土壤相比,滇池各湖区沉积物中各种重金属均有不同程度的富集,尤其是 Cd 与 Hg 元素;从环境综合质量及其演变来看,各湖区沉积物的综合质量均表现为随时间延续污染加重,对此种发展趋势应予以重视,防止沉积物中的重金属成为二次污染源.但各湖区沉积物的重金属污染程度又存在差异,其中以湖南区更为严重,据滇池流域的工业布局推断,此种状况可能与工业分布有关,因此,要改善滇池沉积物的质量,应从源头入手,重点控制工业排放种类与数量,再结合其它治理措施,才

可能收到成效.

参考文献:

[1] 杨丽芬,李友斌. 环保工作者实用手册[M]. (第二版). 北京: 冶金工业出版社, 2001. 657~ 658.

[2] Silvia F, Daniel A W. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River [J]. Water Resource, 2000, **34**(11): 2915~ 2926.

[3] Taylor J G, Ryder S D. Use of the Delphi method in resolving complex water resources issues[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, **39**(1): 183~ 189.

[4] Saaty T L. The analytical hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[5] Pennington W, Cambray R S, Fisher E M, *et al.* Observations on lake sediments using fallout ¹³⁷ Cs as a trace[J]. Nature, 1973, **242**(5396): 324~ 326.

[6] 万国江, Stantschi P, Farrenkoth K. 瑞士 Greifen 湖新近沉积物中¹³⁷Cs 分布及其计年[J]. 环境科学学报, 1985, **5**(3): 360~ 365.

[7] 万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物¹³⁷Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[J]. 科学通报, 1990, **35**(19): 1487~ 1490.

[8] Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout caesium¹³⁷ for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, **19**: 215~ 233.

[9] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 云南断陷湖泊环境与沉积[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 9, 128~ 130, 322, 356, 488.

[10] 张春生, 刘忠保. 现代河湖沉积与模拟实验[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 96.

[11] 谭书香, 曹玲江, 李天瑞. 岩石, 土壤和沉积物中主成分的 ICP-AES 测定[J]. 光谱学与光谱分析, 1994, **14**(5): 51~ 54.

[12] 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 331~ 379.