

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.11.005

贵州草海沉积物中养分的空间分布与评价

周 茜^{1,2}, 彭秋萧², 张才巧², 张进忠¹, 薛晓辉²

1. 西南大学 资源与环境学院, 重庆 400715;

2. 贵州工程应用技术学院 贵州省典型高原湿地生态保护与修复重点实验室, 贵州 毕节 551700

摘要: 在贵州草海国家级自然保护区, 通过对湖区沉积物的采样分析, 结合资料搜集, 研究了草海沉积物中养分的空间分布特征及不同时间的养分含量变化, 并利用模糊综合评价法对其养分进行了评价。结果表明: 沉积物中有机质、总氮、碱解氮、总磷、有效磷和速效钾含量分别为 251.19 g/kg, 11.77 g/kg, 910.63 mg/kg, 0.46 g/kg, 19.95 mg/kg 和 456.67 mg/kg, 其中有机质、总氮和总磷含量呈现出由东至西递增的趋势; 草海沉积物模糊综合指数平均为 4.62, 养分含量较高, 其中有机质、总氮和碱解氮含量达到 I 级水平, 90.91% 的样点速效钾含量达到 I 级水平, 81.82% 的样点总磷含量处于 IV 级及以下水平, 81.82% 的样点有效磷含量达到 III 级及以上水平; 2010—2016 年沉积物有机质、总氮和碱解氮含量分别增加 3.26%, 1.29% 和 37.11%, 总磷和有效磷含量分别降低 31.34% 和 18.87%, 草海有机质含量分别是红枫湖、乌梁素海、青海湖和滇池的 6.54, 12.00, 7.83 和 2.81 倍, 总氮含量分别是上述湖泊的 2.05, 13.69, 6.76 和 3.34 倍, 但总磷含量均低于这些湖泊。

关键词: 草海; 沉积物; 养分含量; 空间分布; 养分评价

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)11-0033-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatial Distribution and Evaluation of Nutrients in the Sediments of Caohai in Guizhou

ZHOU Xi^{1,2}, PENG Qiuxiao², ZHANG Caiqiao²,
ZHANG Jinzhong¹, XUE Xiaohui²

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Guizhou Province Key Laboratory of Ecological Protection and Restoration of Typical Plateau Wetlands,
Guizhou University of Engineering Science, Bijie Guizhou 551700, China

Abstract: Sediment samples and relevant materials were collected of the lake in Caohai National Nature Reserve in Weining county of Guizhou province to study the spatial distribution characteristics of the nutrients in the sediment and their changes in different periods. Fuzzy comprehensive evaluation was made of the nutrients. The results were as follows. The content of organic matter, total nitrogen, alkali-hydro-

收稿日期: 2020-10-06

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合 LH 字[2017]7018); 毕节市科学技术项目(毕科联合字 G[2019]4 号); 毕节市科技局科技联合基金(毕科联合字 G[2019]15 号)。

作者简介: 周 茜, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。

通信作者: 薛晓辉, 博士, 教授。

lyzed nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium was 251.19 g/kg, 11.77 g/kg, 910.63 mg/kg, 0.46 g/kg, 19.95 mg/kg and 456.67 mg/kg, respectively. Organic matter, total nitrogen and total phosphorus showed an increasing trend from the east to the west of the study area. The fuzzy comprehensive index of the sediment of Caohai averaged 4.62, indicating a relatively high level of nutrients. Organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen contents of the sediment samples fell under the category of Level I. Available potassium content in 90.91% of the samples reached Level II. Total phosphorus content in 81.82% of the samples was at or below Level IV, and available phosphorus of 81.82% of the samples was at or above Level III. From 2010 to 2016, organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen in the sediment increased by 3.26%, 1.29% and 37.11%, respectively, and total phosphorus and available phosphorus decreased by 31.34% and 18.87%. The organic matter in Caohai was 6.54, 12.00, 7.83, and 2.81 times that of Hongfeng Lake, Wuliangsu Lake, Qinghai Lake and Dianchi Lake. Total nitrogen in Caohai was 2.05, 13.69, 6.76 and 3.34 times that of Hongfeng Lake, Wuliangsu Lake, Qinghai Lake and Dianchi Lake, respectively. But total phosphorus was lower than that of the four lakes.

Key words: Caohai; sediment; nutrient content; spatial distribution; nutrient evaluation

作为湖泊水体的重要环境要素之一, 沉积物是湖泊水体中养分的重要蓄积库^[1-2], 也是影响水体水质的重要次生污染源。污水排放、大气沉降、地表径流注入和湖泊水生生物的死亡堆积, 使湖泊沉积物中的养分得以富集。研究表明, 滇池草海每年的总磷、总氮和化学需氧量约有 90% 储存于沉积物中^[3]。在特定的水环境条件下, 富集于沉积物中的养分会重新释放进入上覆水体^[4-6], 过多的养分释放将导致藻类过度繁殖, 并加速湖泊富营养化^[7]。因此, 沉积物中养分形态与含量是影响上覆水富营养化的重要因素。目前, 普遍采用的养分评价方法有主成分分析法、灰色关联法、聚类分析法、模糊综合评价法和高通量测序法等^[8-9], 其中模糊综合评价法在参考第二次土壤普查养分分级标准的基础上, 结合多个指标综合评价, 可以得到较为准确的结果^[10]。

草海位于贵州省毕节市威宁彝族回族苗族自治县, 是贵州高原最大的天然淡水湖泊, 国家Ⅰ级保护动物黑颈鹤的重要越冬栖息地之一^[11], 属于国家级自然保护区。杨海全等^[12]监测发现, 草海沉积物有机碳含量在 6.86%~34.85% 之间, 且来源于藻类和沉水植物; 张家春等^[13]研究表明, 草海底泥总氮、总磷含量分别在 2.66~18.88 g/kg, 0.40~0.86 g/kg 间波动。目前, 关于草海沉积物养分的空间分布研究较少, 缺乏沉积物不同时间养分含量变化和与其他湖泊的比较研究。为此, 课题组在草海湖区采集沉积物表层样品, 测定样品中的总氮、总磷、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量, 研究草海沉积物中养分的空间分布特征, 评价养分状况, 并结合文献分析沉积物中不同时间的养分含量变化, 为草海生态环境保护提供科学参考。

1 材料与方法

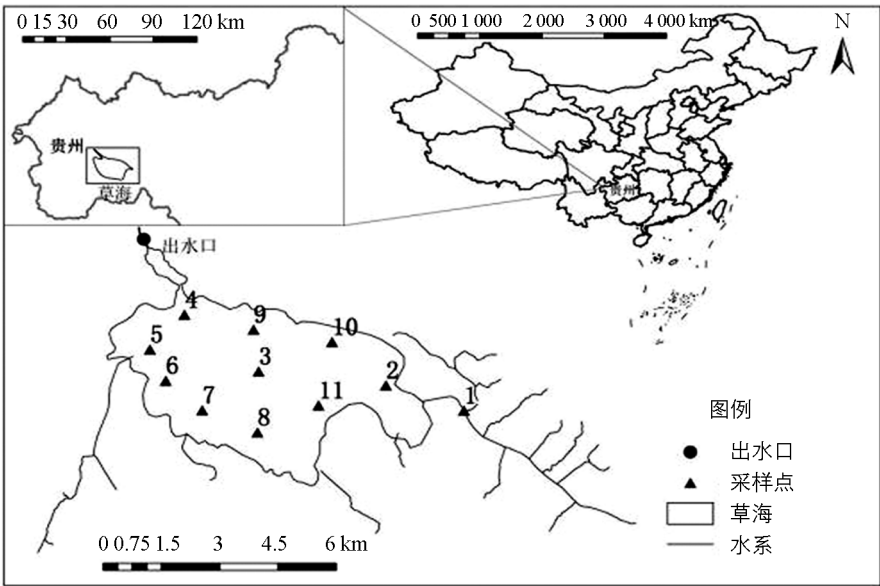
1.1 研究区概况

草海位于贵州省威宁彝族回族苗族自治县县城西南侧(26°49′—26°53′ N, 104°10′—104°18′ E), 地势由西南东三面至北面降低, 出口位于西北角。湖区面积为 25 km², 平均水深仅 2 m, 最深处为 5.13 m^[14]。当地属于亚热带半湿润季风气候, 昼夜温差较大, 年均温度 10.6 °C^[15], 年均降水量 950.9 mm, 5—10 月降水占全年降水量的 88%。湖区的水生植物主要有竹叶眼子菜、微齿眼子菜、水葱、菹草、狐尾藻和金鱼藻等^[16], 鸟类是草海重要的保护动物, 尤其是以黑颈鹤为代表的候鸟群, 白肩雕、白尾海雕、灰鹤、白琵鹭等国家Ⅰ、Ⅱ级保护鸟类也有分布。草海周边农作物以玉米、马铃薯为主。土壤类型主要有黄棕壤、石质土、石灰土和沼泽土, 沉积物 pH 值为 6.76。

1.2 样品的采集与处理

2016 年 7 月在草海湖区, 根据入水口、出水口、湖中心和人为活动情况设置采样点 11 处(图 1), 其中点 1, 2, 10, 11 处于东部区域, 点 9, 3, 7, 8 分布在中部区域, 点 4, 5, 6 分布在西部区域。用彼得森采泥器采

集表层沉积物样品,带回实验室后阴干,研磨过筛后备用.



底图来源于国家地理信息公共服务平台,审图号:GS(2019)1822.

图 1 草海沉积物采样点分布图

1.3 样品测定方法

采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化-稀释热法测定有机质含量;凯氏定氮法测定总氮含量;碱解扩散法测定碱解氮含量;酸溶光度法测定总磷含量; $NaHCO_3$ 浸提法测定有效磷含量; NH_4OAc 浸提-火焰原子吸收光度法测定速效钾含量^[17].

1.4 养分评价方法

采用《全国第二次土壤普查养分分级标准》^[18-19]对沉积物养分进行评价(表 1).

表 1 全国第二次土壤普查养分分级标准

分级	有机质 /(g · kg ⁻¹)	总氮 /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg · kg ⁻¹)	总磷 /(g · kg ⁻¹)	有效磷 /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 /(mg · kg ⁻¹)
I	>40	>2	>150	>1	>40	>200
II	30~40	1.5~2	120~150	0.8~1	20~40	150~200
III	20~30	1~1.5	90~120	0.6~0.8	10~20	100~150
IV	10~20	0.75~1	60~90	0.4~0.6	5~10	50~100
V	6~10	0.5~0.75	30~60	0.2~0.4	3~5	30~50
VI	<6	<0.5	<30	<0.2	<3	<30

采用模糊综合评价法对各采样点进行养分综合评价^[20],具体过程如下:

- 1) 确定评价因素向量: $U=\{\text{有机质, 全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾}\}$;
- 2) 确定各评价因素的模糊向量 R

$$R=\begin{Bmatrix}r_1\\r_2\\\vdots\\r_n\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1m}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2m}\\\cdots&\cdots&\cdots&\cdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nm}\end{Bmatrix}\tag{1}$$

式(1)中, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 和 r_6 分别代表有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷和速效钾的模糊向量, $r_{ij}(i=1, \cdots, n, \text{表示 } n \text{ 个评价因素}; j=1, \cdots, m, \text{表示 } m \text{ 个等级})$ 为第 i 个因素对第 j 个等级的隶属度,隶属度采用“降半梯形”法确定^[20]. 评价等级数值参考全国第二次土壤普查养分分级数值^[10].

- 3) 计算模糊综合评价结果 B

$$B=A\times R$$

(2)

式(2)中, A 为土壤养分各参评因素的权重, 有机质、总氮、碱解氮、总磷、有效磷和速效钾的权重分别为 0.408, 0.204, 0.136, 0.088, 0.097 和 0.067^[20].

4) 计算模糊综合指数 FCI

$$FCI=B\times S$$

(3)

式(3)中, FCI 可划分Ⅰ(<2.0), Ⅱ($2.0\sim2.9$), Ⅲ($3.0\sim3.9$), Ⅳ($4.0\sim4.9$)和Ⅴ(≥5.0)共 5 级, 分别代表综合养分低、较低、中等、较高和高水平; B 为模糊综合评价结果; S 为等级标准向量, $S^T=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ ^[21].

2 结果与讨论

2.1 草海沉积物养分状况

沉积物养分含量影响水生植物的生长发育^[22], 草海湖区各采样点的养分含量高低不一(表 2). 有机质含量在 43.24~415.91 g/kg 之间, 平均值为 251.19 g/kg, 变异系数为 46.77%. 总氮含量在 2.65~18.85 g/kg 之间, 平均值为 11.77 g/kg, 最大值是最小值的 7.11 倍, 变异系数为 41.92%; 碱解氮能够反映土壤的氮供给能力, 沉积物碱解氮含量最低仅为 186.89 mg/kg, 最高可达 1672.63 mg/kg, 变异系数为 43.36%, 平均值为 910.63 mg/kg, 占总氮含量的 7.74%. 总磷含量在 0.14~0.77 g/kg 之间, 平均值为 0.46 g/kg; 有效磷含量在 1.15~40.00 mg/kg 之间, 平均值为 19.95 mg/kg; 总磷与有效磷的变异系数分别为 34.42%和 59.71%, 有效磷占到总磷的 4.34%. 速效钾含量在 138.83~857.07 mg/kg 之间, 平均值为 456.67 mg/kg, 变异系数为 39.83%.

表 2 草海沉积物养分含量

样 点	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
1	43.24i	2.65h	186.89k	0.39cd	34.59b	242.80f
2	150.09h	7.01g	518.16j	0.14e	21.01d	443.37e
3	253.03e	12.74d	996.20d	0.47cd	12.48e	423.75e
4	144.93h	7.64g	739.01i	0.44cd	25.93c	442.63e
5	415.91a	18.85a	1279.75b	0.77a	40.00a	449.70e
6	289.68d	13.37d	886.05f	0.52cb	14.12e	516.37c
7	384.09b	16.26c	1211.51c	0.35d	1.15f	138.83g
8	309.88c	13.22d	964.21e	0.44cd	2.58f	591.23b
9	168.90g	9.34f	790.58g	0.52cb	23.13cd	857.07a
10	225.31f	10.51e	771.93h	0.61b	22.10cd	442.00e
11	378.00b	17.86b	1672.63a	0.40cd	22.31cd	475.63d
最小值	43.24	2.65	186.89	0.14	1.15	138.83
最大值	415.91	18.85	1672.63	0.77	40.00	857.07
均值	251.19	11.77	910.63	0.46	19.95	456.67
标准差	117.48	4.93	394.86	0.16	11.91	181.89
变异系数/%	46.77	41.92	43.36	34.42	59.71	39.83

注: 小写字母表示通过 LSD 检验的不同区域养分含量差异具有统计学意义($p<0.05$).

样点 5 沉积物的有机质、总氮、总磷和有效磷含量显著高于其他采样点, 分别达到 415.91 g/kg, 18.85 g/kg, 0.77 g/kg 和 40.00 mg/kg. 样点 1 沉积物的有机质和总氮含量最低, 分别为 43.24 g/kg 和 2.65 g/kg, 这可能是由于其位于入水口河道, 沉积物受水流冲刷影响, 养分向湖内迁移所致. 有效磷含量以样点 7 处最低, 总磷含量在样点 2 处仅为 0.14 g/kg, 样点 1 沉积物的碱解氮含量最低(186.89 mg/kg), 样点 11 处碱解氮含量最高(1 672.63 mg/kg), 样点 7 沉积物的速效钾含量为 138.83 mg/kg, 显著低于其他各采样点, 而在样点 9 处最高(857.07 mg/kg).

2.2 草海沉积物养分含量的区域差异

草海东部有主要的入水口大中河,而出水口位于西部. 根据采样点的位置将草海划分为东、中、西 3 个部分,发现不同区域草海沉积物中养分含量不同(表 3),沉积物有机质、总氮、总磷含量以西部最高,分别为 283.51 g/kg,13.29 g/kg 和 0.58 g/kg,并由东至西依次递增,且中、西部有机质、总氮和总磷含量显著高于东部,这与杨海全等^[12]和郭媛等^[23]的研究结果相似. 草海中部沉积物的碱解氮和速效钾含量分别为 990.63 mg/kg 和 502.72 mg/kg,显著高于西部和东部;东部碱解氮和速效钾含量最低,分别为 787.40 mg/kg 和 400.95 mg/kg. 中部沉积物的有效磷含量最低,为 9.84 mg/kg;西部有效磷含量最高(26.68 mg/kg),西部和东部有效磷含量显著高于中部.

表 3 草海沉积物不同区域间养分差异

区域	有机质/ (g · kg ⁻¹)	总氮/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	总磷/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
东部	199.16b	9.51c	787.40c	0.39c	25.00a	400.95c
中部	278.98a	12.89b	990.63a	0.45b	9.84b	502.72a
西部	283.51a	13.29a	968.27b	0.58a	26.68a	469.57b

注:小写字母表示通过 LSD 检验的不同区域养分含量差异具有统计学意义($p<0.05$).

2.3 草海沉积物的养分评价

根据《全国第二次土壤普查养分分级标准》,所有样点的有机质、总氮和碱解氮含量全为Ⅰ级水平,养分含量高. 90.91%的样点速效钾含量达到Ⅰ级水平(表 4),速效钾供给能力强,但总磷含量较低,有效磷含量中等,这是由于沉积物中的磷主要来自母岩,而贵州土壤普遍缺磷所致. 草海沉积物 81.82%的样点总磷含量在Ⅳ级及以下水平,少部分样点达到Ⅲ级水平,81.82%的样点有效磷含量达到Ⅲ级及以上水平,说明在草海沉积物中,尽管磷素不丰富,但有效磷含量相对较高,磷素的供给能力较强. 采用模糊综合评价法可得到 11 个土样和区域养分模糊综合指数 FCI ,发现采样点 FCI 值在 4.24~4.90 间波动,平均值为 4.62,养分水平较高,其中样点 5 的 FCI 最高(4.90),样点 7 的 FCI 最低(4.24),但也属于养分较高等级.

表 4 草海各采样点沉积物的养分评价

采样点	有机质	总氮	碱解氮	总磷	有效磷	速效钾	FCI	评价结果
1	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅴ	Ⅱ	Ⅰ	4.71	较高
2	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅵ	Ⅱ	Ⅰ	4.56	较高
3	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅰ	4.60	较高
4	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	4.69	较高
5	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	4.90	较高
6	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅰ	4.63	较高
7	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅲ	4.24	较高
8	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅵ	Ⅰ	4.37	较高
9	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	4.71	较高
10	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	4.74	较高
11	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	4.65	较高
平均值	—	—	—	—	—	—	4.62	较高

注:10 个样点速效钾养分等级为Ⅰ,占总 11 个样点中的 90.91%;9 个样点总磷含量在Ⅳ级及以下水平,占总 11 个样点中的 81.82%;9 个样点有效磷含量达到Ⅲ级及以上水平,占总 11 个样点中的 81.82%.

2.4 草海沉积物养分多年变化

通过查阅文献和资料,搜集到 2010 年草海沉积物的养分数据(表 5). 与 2010 年相比,2016 年有机质和总氮含量变化较小,分别上升了 3.26%和 1.29%. 已有研究表明草海水生维管束植物量近 30 年呈现出上升趋势^[24],植物通过光合作用将碳、氮等元素储存在体内,当其死亡时将养分以有机物形式返还给沉积物,造成沉积物中有机质和总氮积累. 但是,有机质和总氮含量上升幅度不大,可能是草海沉积物的养分

分布不均匀,二者取样点差异所致.与 2010 年相比,草海沉积物的总磷含量降低 31.34%,可能是水生植物数量变化、磷的来源、采样季节、有机磷的分解与释放综合作用的结果.碱解氮含量提高了 37.11%,有效磷含量降低了 18.87%,主要是因为这 2 个指标均属于速效养分,受环境影响较大.

表 5 草海沉积物养分多年变化

年份	采样点数	有机质/ (g · kg ⁻¹)	总氮/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	总磷/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	参考文献
2010	16	243.27	11.62	664.14	0.67	24.59	有机质来源于郭媛等 ^[23] 、其余数据来源于张家春等 ^[13]
2016	11	251.19	11.77	910.63	0.46	19.95	本研究

2.5 草海养分与国内类似湖泊比较

与国内类似湖泊比较,草海沉积物中的有机质、总氮和总磷含量差异较大(表 6).红枫湖位于贵州,是典型的人工湖泊,草海沉积物有机质和总氮含量分别是红枫湖的 6.54 倍和 2.05 倍,可能是因为草海的水生植物量高于红枫湖,以浮游植物为例,草海浮游植物的种类和生物量均远高于红枫湖^[25-27],碳、氮容易积累于沉积物中.但草海沉积物总磷仅为红枫湖的 32.86%,可能是红枫湖为人工湖,沉积物养分受人为影响大.草海与乌梁素海同为草型湖泊,其沉积物的有机质和总氮含量分别是乌梁素海的 12.00 倍和 13.69 倍,总磷含量是乌梁素海的 83.64%.草海、滇池和青海湖为中国 3 大高原湖泊,草海沉积物的有机质、总氮和总磷含量分别是青海湖的 7.83,6.76 和 0.78 倍,可能是青海湖为深水湖泊,平均水深达到 21.7 m,而草海为浅水湖泊,可以大面积生长水生植物,具有更高的初级生产力^[28],可向沉积物提供更多的有机质和氮素;草海沉积物的有机质、总氮和总磷含量分别是滇池的 2.81,3.34 和 0.27 倍,表现出较高的有机质和总氮含量,较低的磷含量.

表 6 国内相近类型湖泊沉积物中有机质、总氮和总磷平均含量比较

湖泊名称	湖泊类型	有机质/(g · kg ⁻¹)	总氮/(g · kg ⁻¹)	总磷/(g · kg ⁻¹)	参考文献
红枫湖	高原人工湖泊	38.43	5.74	1.40	[7]
乌梁素海	草型湖泊	20.93	0.86	0.55	[29]
青海湖	高原深水湖泊	32.07	1.74	0.59	[30]
滇池	高原浅水湖泊	89.25	3.52	1.73	[31-33]
草海	高原浅水湖泊	251.19	11.77	0.46	本研究

3 结 论

1) 草海沉积物中有机质、总氮、碱解氮、总磷、有效磷和速效钾含量平均值分别为 251.19 g/kg, 11.77 g/kg,910.63 mg/kg,0.46 g/kg,19.95 mg/kg 和 456.67 mg/kg.且草海有机质、总氮和总磷含量呈现出由东至西递增的趋势.

2) 草海沉积物养分模糊综合指数为 4.62,属较高等级.有机质、总氮、碱解氮达Ⅰ级水平,速效钾的绝大部分达Ⅰ级水平,有效磷大部分处于Ⅱ级水平,总磷主要处于Ⅳ级及以下水平,有效磷主要处于Ⅲ级及以上水平.

3) 2010—2016 年草海沉积物有机质和总氮含量增加,但变化较小;碱解氮、总磷和有效磷含量变化大于有机质和总氮,草海有机质和总氮含量高于红枫湖、青海湖、滇池和乌梁素海,而总磷含量低于上述湖泊.

参考文献:

[1] BURFORD M A, GREEN S A, COOK A J, et al. Sources and Fate of Nutrients in a Subtropical Reservoir [J]. Aquatic Sciences, 2012, 74(1): 179-190.

[2] VARJO E, LIIKANEN A, SALONEN V P, et al. A New Gypsum-Based Technique to Reduce Methane and Phophorus Release from Sediments of Eutrophied Lakes: (Gypsum Treatment to Reduce Internal Loading) [J]. Water Research, 2003, 37(1): 1-10.

[3] 刘臣炜,汪德耀.湖泊富营养化内源污染的机理和控制技术研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 814-818.

[4] KADIRVELU K, GOEL J, RAJAGOPAL C. Sorption of Lead, Mercury and Cadmium Ions in Multi-Component System Using Carbon Aerogel as Adsorbent [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2): 502-507.

[5] PIGNATELLO JJ, OLIVEROS E, MACKAY A. Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, 36(1): 1-84.

[6] MAHATA N, SILVA A R, PEREIRA M F R, et al. Anchoring of a [Mn(Salen)Cl] Complex Onto Mesoporous Carbon Xerogels [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 311(1): 152-158.

[7] 叶 锋,张明时,刘汉林,等. 红枫水库底质污染物富集现状分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 8-12.

[8] 杨文娜,任嘉欣,李忠意,等. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1307-1313.

[9] 李雪丹,徐 绯,王 璨,等. 基于高通量测序研究锦屏极深岩层微生物多样性 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(1): 016004.

[10] 荣艳芳. 林区土壤养分的模糊综合评价 [J]. 防护林科技, 2018, 179(8): 28-30.

[11] 谷小溪,陈新国,董建伟,等. 贵州省威宁草海淤积的主要因素与机制 [J]. 吉林水利, 2017(10): 1-6.

[12] 杨海全,陈敬安,刘 文,等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素 [J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 297-303.

[13] 张家春,林绍霞,张清海,等. 贵州草海底泥-上覆水中氮磷含量时空分布特征 [J]. 广东农业科学, 2014, 41(9): 184-188.

[14] 任秀秀,陈永祥,冯 图,等. 贵州威宁草海湿地的研究现状 [J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2017, 35(3): 18-34.

[15] 毛天旭,赵庆霞. 典型喀斯特高原湖泊气候变化特征分析——以贵州草海为例 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(35): 92-98.

[16] 何天容,曾玲霞,许议元,等. 贵州草海水生植物汞分布及其对沉积物汞的响应 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 793-800.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[18] 陈 强,杨劲松,姚荣江,等. 河套平原典型县域耕地土壤养分空间变异特征研究 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(10): 102-108.

[19] 黄小辉,王玉书,魏立本,等. 梁平柚主要产区土壤养分状况及肥力评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 49-56.

[20] 李 萍. 藏东南耕作棕壤养分模糊综合评价 [J]. 土壤, 2003, 35(5): 435-437, 439.

[21] 武 伟,唐明华,刘洪斌. 土壤养分的模糊综合评价 [J]. 西南农业大学学报, 2000, 22(3): 270-272.

[22] 赵伟文,梁文俊,魏 曦. 不同林分密度华北落叶松人工林土壤养分特征 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 84-92.

[23] 郭 媛,林昌虎,何腾兵,等. 草海表层沉积物有机碳、氮、磷分布特征及污染评价 [J]. 贵州科学, 2012, 30(1): 27-32.

[24] 刘 文,李 宏,张玉武,等. 贵州草海水生维管束植物分布现状及近 30 年变化特征研究 [J]. 湖北农业科学, 2015, 54(23): 5872-5876.

[25] 梁正其,姚俊杰,方贵镇,等. 红枫湖浮游植物群落的结构特征分析 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39(11): 213-216.

[26] 晏 妮,潘 鸿,王 洋,等. 威宁草海浮游植物时空分布及其数量特征 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 55-58.

[27] 梁正其,陈方银,李秀红,等. 贵州草海湿地浮游植物的群落结构及多样性分析 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(18): 280-282, 288.

[28] 年跃刚,宋英伟,李英杰,等. 湖泊富营养化稳态转换理论与生态恢复讨论 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(1): 67-70.

[29] 赵胜男,李畅游,史小红,等. 乌梁素海沉积物中有机质与营养元素分布特征研究 [J]. 中国农村水利水电, 2010, 331(5): 58-60, 64.

[30] 陈学民,朱阳春,伏小勇,等. 青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 395-401.

[31] 彭 丹,金 峰,吕俊杰,等. 滇池底泥中有机质的分布状况研究 [J]. 土壤, 2004, 36(5): 568-572.

[32] 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 [J]. 环境科学, 2015, 36(2): 471-480.

[33] 刘 勇. 滇池近代沉积物营养盐沉积记录及重金属污染特征研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.