

渭河陕西段河道沉积物中碳氮磷时空变化分析及评价

何琪琳^{1,3}, 张风宝^{1,2}, 吴普侠⁴, 杨明义^{1,2}, 赵国平⁴

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学,
北京 100049; 4.陕西省林业科学院 黄土高原水土保持与生态修复国家林业局重点实验室, 西安 710082)

摘 要:河流沉积物是营养元素的源和汇,反映了河流的污染状况。以 2014—2016 年渭河陕西段 16 个采样点沉积物中的碳氮磷含量为研究对象,在分析了沉积物中碳氮磷含量时空变化特征的基础上,采用模糊综合评价法对渭河陕西段沉积物中营养元素污染的染状况进行了评价。结果表明:沉积物中碳氮磷含量在 2016 年较前两年均有所降低,但在汛期(2015 年)无显著变化。沉积物中碳氮磷含量变化具有相似的空间特征,在清姜河入渭处和灞河入渭处达到峰值,兴平和沙王渡处存在低谷。渭河陕西段沉积物营养元素污染等级为Ⅱ级,存在一定的生态风险,需注意磷元素的外源输入以及支流处污染物处理与排放管理。

关键词:渭河; 沉积物; 碳; 氮; 磷; 模糊综合评价

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0088-06

Spatiotemporal Variations and Evaluation of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Sediments of the Weihe River in Shaanxi Province

HE Qilin^{1,3}, ZHANG Fengbao^{1,2}, WU Puxia⁴, YANG Mingyi^{1,2}, ZHAO Guoping⁴

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation & Ecological Restoration of the Loess Plateau, Shaanxi Academy of Forestry 710082, China)

Abstract:In this study, the contents of carbon, nitrogen, and phosphorus in the sediments of 16 sampling points in the Shaanxi section of the Weihe River from 2014 to 2016 were measured. Based on the analysis of the temporal and spatial characteristics of the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in the sediments, the fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the pollution of nutrients in the sediments of the Weihe River in Shaanxi. The results showed that the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in the sediments decreased in 2016 compared with the previous two years, but there was no significant change during the flood season in 2015; the distributions of the contents of carbon, nitrogen, and phosphorus in the sediments had the similar spatial characteristics, reaching peaks in Qingjiang River and Bahe River, and reaching troughs in Xingping and Shawangdu; the pollution condition of sediment nutrients in the Shaanxi section of the Weihe River was level Ⅱ, and there were certain ecological risks. It is necessary to pay attention to the external input of phosphorus and the management of pollutant treatment and discharge in tributaries.

Keywords: Weihe River; sediments; carbon; nitrogen; phosphorus; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期:2020-06-15

修回日期:2020-08-03

资助项目:陕西省水利科技计划项目“渭河下游河道富集污染物的时空变化研究”(2013SLkj-11)

第一作者:何琪琳(1995—),女,广东兴宁人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail:heqilin1203@163.com

通信作者:张风宝(1980—),男(回族),宁夏回族自治区彭阳人,研究员,主要从事坡面土壤侵蚀过程及其环境效应研究。E-mail:fbzhang@nwsuaf.edu.cn

河流沉积物是河流生态系统的重要组成部分,是重金属、有毒有机化合物等环境污染物及 C,N,P 等营养元素的源和汇,影响着河流水质,反映了河流的污染状况^[1-2]。沉积物中营养元素含量对污染物在沉积物和水环境中的迁移和转化等地球化学行为中起着关键性的作用^[3-4]。在渭河流域,学者们更多关注沉积物中重金属的来源、分布特征以及污染评价,对沉积物中有机质、营养元素研究较少,且现有的研究中选取采样点数量少且样点间距离较大,缺乏连续性的研究^[5-7]。此外,国内外对沉积物营养元素污染评价方法多为单因子评价^[6,8-10],这些方法在不同程度上能客观地反映营养元素的污染程度,但依据某一方面对其进行评价,往往会产生较为片面的评价结果。模糊综合评价法引入了模糊数学的概念,对受多个因素所影响的事物或现象作总的评价,适合研究具有不确定的对象以及对象之间的模糊关系,被广泛应用于水质评价、土壤质量评价、生态环境质量评价及安全影响评价等方面^[11-13]。

渭河是关中平原的重要灌溉水源地,随着渭河沿线城市化与工业化的发展,渭河流域环境质量受到严重影响。因此,本文在渭河陕西段设置了 16 个采样点,在 2014 年 11 月、2015 年和 2016 年进行了 5 次采样,对沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量进行测定,探讨渭河陕西段沉积物中营养元素含量的时空变化特征,并采用模糊综合评价法对渭河陕西段沉积物中营养元素污染状况进行评价。

表 1 渭河沉积物采样断面坐标

编号	采样点	经度 E	纬度 N	编号	采样点	经度 E	纬度 N
1	林家村	107°03′28.74″	34°22′20.02″	9	草滩	108°58′02.73″	34°22′20.02″
2	清姜河入渭	107°07′02″	34°21′37″	10	灞河入渭	109°00′39.16″	34°25′21.80″
3	卧龙寺桥	107°18′09.77″	34°21′00.31″	11	耿镇桥	109°05′58.98″	34°28′02.16″
4	虢镇桥	107°24′00.56″	34°20′26.14″	12	新丰镇大桥	109°14′35.29″	34°26′17.07″
5	常兴桥	107°49′57.15″	34°14′10.23″	13	沙王渡	109°28′36.29″	34°32′53.79″
6	黑河入渭	108°25′01.22″	34°11′46.04″	14	树园	109°32′55.31″	34°31′28.83″
7	兴平	108°30′18.57″	34°13′43.92″	15	洛河入渭	110°02′47.05″	34°45′43.03″
8	咸阳铁桥	108°42′16.40″	34°19′18.14″	16	潼关吊桥	110°14′09.82″	34°36′57.53″

1.2.2 样品分析及测定 将样品放置于阴凉处自然风干,剔除样品中石块、植物根系和有机残渣等杂物。风干后的样品研磨过 100 目的尼龙筛备用。沉积物中 TN,TP 和有机质分别采用高氯酸—硫酸消化法(LY/T1228-1999)、酸熔—钼锑抗比色法(LY/T1232-1999)和重铬酸钾氧化—外加热法(LY/T1237-1999)进行测定。

1.2.3 模糊综合评价法 模糊综合评价法通过隶属度和权重值来描述沉积物中营养元素污染状况的不确定

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河是黄河的一级支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,自南向东横穿关中盆地,经陕西省潼关港口注入黄河^[14]。渭河陕西境内流长 512 km,流域面积 6.71 万 km²。渭河流域属于典型的大陆性季风气候,多年平均降水量在 500~800 mm,降水集中于 7—9 月,多年平均气温在 7.8~13.5℃^[15]。渭河多年平均年径流量为 67.4 亿立方米,多年平均年输沙量为 3.03 亿立方米(数据来源于《全国水情年报》)。渭河陕西段工业污染物排放五年平均为 4.34 亿万 t,农用化肥施用折纯量五年平均为 17.05 万 t(数据来源于《陕西统计年鉴》)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 渭河流域汛期多集中在 6—9 月,考虑到年内河道沉积物的冲淤变化及不同时间尺度的可对比性,分别在 2014 年 11 月、2015 年 5 月(汛前),2015 年 8 月(汛中),2015 年 11 月(汛后)和 2016 年 11 月进行了样品采集。根据陕西省河流省界水质监测断面设置和采样原则,在支流的入渭口以及流经的主要城市设置采样断面,一共设置了 16 个采样断面(表 1),每个采样断面设置 3 到 5 个采样点,在每一个采样点选择合适位置采集表层 0—10 cm 的沉积物混合样,每个采样点至少采集沉积物混合样 2 000 g,分别装入自封袋内带回实验室。

性,对多指标进行综合评价,能全面客观地对沉积物营养元素环境质量进行评价,使评价结果更趋于实际情况^[16]。本研究采用加拿大安大略省环境和能源部根据沉积物中污染物对底栖生物的生态毒性效应制定的环境质量评价标准^[17](表 2),该标准在土耳其底格里斯河^[18]、伊朗 Shadegan 和 Hawr Al Azim 湿地^[19]、美国安大略湖^[20]、江苏省石臼湖^[21]、渭河宝鸡段^[6]和渤海中部海域^[22]等地区得到了广泛的应用。

评价因子与沉积物营养元素污染状况在一定浓

度范围内呈线性关系^[23],故本文采用降半梯形法(公式 1)^[24]来描述不同评价因子对应各分级评价标准的隶属度。权重可以反映各个评价因子在综合评价过程中所占的地位和所起的作用,为了减小主观因素对权重赋值的影响,客观地表达各评价因子作用的大小,采用超标倍数法(公式 2)计算权重分配矩阵。最后,采用加权平均模型(公式 3)来建立模糊综合评价模型,体现各评价因子对评价结果的综合影响。

表 2 加拿大安大略省有机质和营养元素评价标准

级别		TN/ (mg·kg ⁻¹)	TP/ (mg·kg ⁻¹)	TOC/ (g·kg ⁻¹)
I 级	安全级	<550	<600	<10
II 级	最低级	550	600	10
III 级	严重级	4800	2000	100

注:安全级别是指沉积物中底栖生物未观察到中毒效应;最低级别是指沉积物虽然已受污染,但是沉积物中的多数底栖生物仍可承受;严重级别是指底栖生物群落已经遭到明显的损害。

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_i \leq a_1 \\ \frac{a_1 - x_i}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x_i \leq a_2 \\ 0 & a_2 < x_i \end{cases} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{x_i}{x_{0i}} \quad (2)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为 x_i 为第 i 个评价因子 u_i 的实测值; a_1, a_2 为相邻两个分级评价标准 I, J 的标准值; w_i 为评价

因子权重; x_{0i} 为第 i 个评价因子作为某种用途时的浓度允许值,一般可取第 i 个评价因子的分级评价标准的平均值; b_i 为最终评价结果对应于第 j 个等级的隶属度; w_i 为对应的权重; r_{ij} 为模糊关系矩阵 R 中的对应元素; m 为参评因子个数。该模型计算结果已经自动归一化,集合中最大值所对应的级别作为最终评价结果。

2 结果与分析

2.1 基本统计特征分析

为了宏观了解渭河陕西段沉积物中碳氮磷含量的基本特征,对其进行了基本统计特征分析,见表 3。渭河沉积物中 TOC 含量在 0.77~25.22 g/kg,平均值为 5.61±4.76 g/kg;TN 含量在 0.07~3.84 g/kg,平均值为 0.64±0.62 g/kg;TP 含量在 0.45~1.84 g/kg,平均值为 0.71±0.18 g/kg。沉积物中 TOC, TN 和 TP 含量的变异系数在 0.26~0.97,均属于中等变异(0.1~1);整体上沉积物中 TN, TOC 含量变异性相对较大,TP 含量变异较小。所有变量的偏度值都大于 0,属于右偏态,说明数据位于均值右边的比位于左边的少,即变量值较小的样本占多数;相对而言,沉积物中 TN 含量的偏度值较小,接近正态分布。3 个变量的峰度值均为正值,即变量分布的峰值比较陡峭,数据之间差异性大。依据 Shapiro-Wilk (S-W)正态分布检验,表明沉积物中 TOC, TN 和 TP 含量均符合正态分布。

表 3 渭河沉积物中营养元素统计特征

变量	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	正态分布检验
TOC	0.77	25.22	5.61	4.76	0.85	2.02	4.91	S-W
TN	0.07	3.84	0.64	0.62	0.97	2.64	8.77	S-W
TP	0.45	1.84	0.71	0.18	0.26	2.45	9.41	S-W

注:表中沉积物中 TOC, TN 和 TP 含量的单位均为 g/kg, S-W 表示服从 Shapiro-Wilk(S-W)正态分布检验。

2.2 时空变化分析

2.2.1 时间变化特征分析 对渭河陕西段沉积物中碳氮磷的时间变化特征(图 1)进行分析,2014 年、2015 年和 2016 年 11 月的 TOC 含量平均值分别为 7.23±5.73 g/kg, 7.27±4.70 g/kg 和 3.79±2.83 g/kg, TN 含量平均值分别为 0.79±0.80 g/kg, 0.89±0.56 g/kg 和 0.38±0.28 g/kg, TP 含量平均值分别为 0.79±0.21 g/kg, 0.76±0.19 g/kg 和 0.67±0.09 g/kg。从平均值来看,沉积物中碳氮磷含量在 2016 年较前两年均有所降低,说明渭河陕西段沉积物中营养元素环境质量有所好转。方差分析得出 TOC, TN 和 TP 含量年际变化的显著性分别为 0.05, 0.05, 0.13,表明沉积物中碳、氮含量在年际上具有显著差异,磷含量变化不明显。在汛前、汛中和汛后的 TOC

含量平均值分别为 4.51±2.45 g/kg, 5.91±3.39 g/kg 和 7.27±4.70 g/kg, TN 含量平均值分别为 0.50 g/kg±0.33, 0.69±0.40 g/kg 和 0.89±0.56 g/kg, TP 含量平均值分别为 0.70±0.11 g/kg, 0.66±0.10 g/kg 和 0.76±0.19 g/kg,可以看出汛期内沉积物中碳和氮的表现为汛前<汛中<汛后,磷表现为汛中<汛前<汛后。采用方差分析得出 TOC, TN 和 TP 含量在汛前、汛中和汛后的显著性分别为 0.11, 0.06, 0.18,说明沉积物中碳氮磷含量在汛期无显著变化。

2.2.2 空间变化特征分析 沉积物中营养元素的沿程分布(图 2)可以看出三者具有相似的沿程变化特征,均在清姜河入渭处和灞河入渭处达到峰值, TOC, TN 和 TP 含量在清姜河入渭处分别超出平均值 35%, 22%和 12%;在灞河入渭处分别超出平均值

59%,56%和 10%;均在兴平和沙王渡降低达到低谷。沉积物中 TOC,TN 和 TP 含量两两相关,TOC 与 TN,TP 相关系数分别为 0.98,0.84,TN 与 TP 相关系数为 0.87,均在 0.01 水平上显著相关;说明沉积物中的碳氮磷可能具有相同的来源。

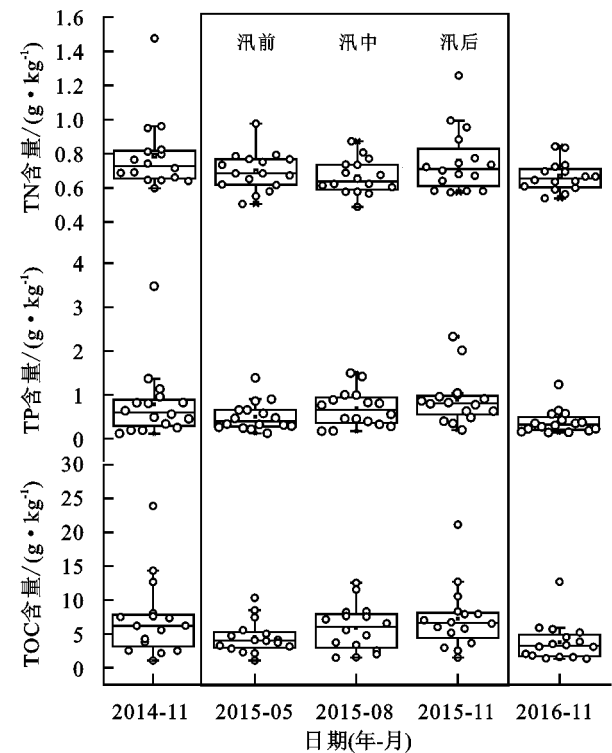
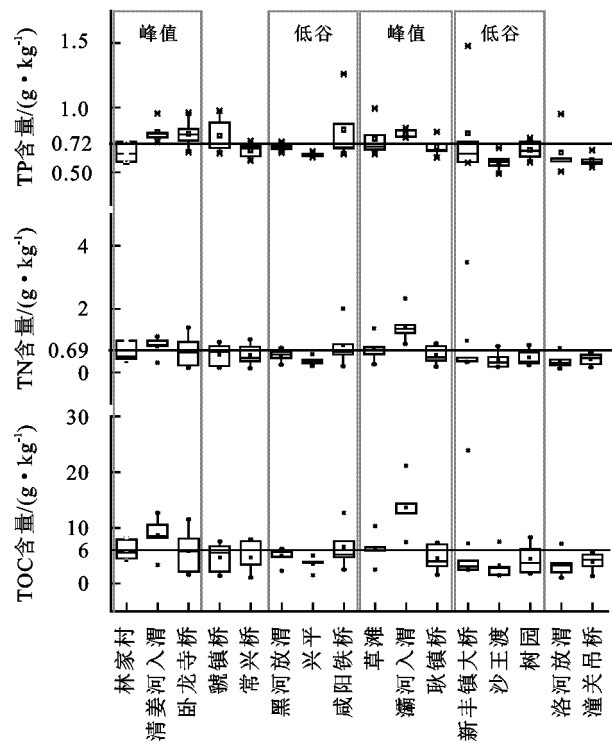


图 1 渭河沉积物中营养元素时间变化特征



注:图中水平线处为 TOC,TN 和 TP 含量的平均值。

图 2 渭河沉积物中营养元素沿程变化

采用聚类分析对相似的采样点(空间变异性)进

行分组,识别特定的污染区域。本研究以欧氏距离为相似性度量,采用 Ward's 方法对渭河沉积物中碳氮磷含量数据集进行层次聚类分析(图 3),其中渭河 16 个沉积物采样点在欧式距离为 15 处被分成两个具有统计意义的聚类。聚类 1 包括 9 个采样点(常兴桥、黑河入渭、兴平、耿镇桥、新丰镇大桥、沙王渡、树园、洛河入渭和潼关吊桥),聚类 2 包括 7 个采样点(卧龙寺桥、虢镇桥、林家村、咸阳铁桥、草滩、清姜河入渭和灞河入渭)。聚类分类随着显著性水平的变化而变化,这些聚类中的地点具有相似的特征和人为或自然背景源类型。聚类 1 对应低污染采样点,聚类 2 对应高污染采样点。结合采样野外观测对聚类 2 中采样点周边进行分析,高污染采样点可能与人类活动以及沿岸分布的化工、机械、食品加工等工业企业分布相关。在卧龙寺桥、咸阳铁桥和清姜河入渭处排污口较多,污染物浓度高,废水中碳氮磷被沉积物吸附。在林家村和草滩处有大量泥沙淤积,沉积物中碳氮磷含量较高。灞河入渭处人口密集,是西安市城市污水主要排放地,存在大量含氮、磷有机化合物的生活污水流入。

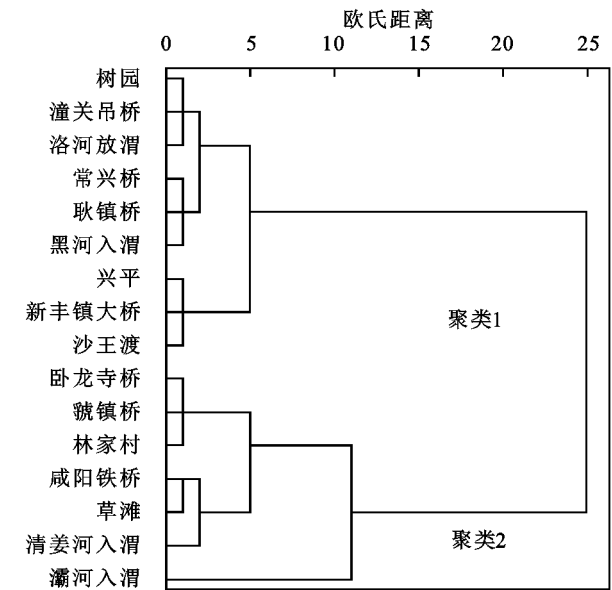


图 3 渭河河道沉积物空间聚类分析结果

3 营养元素污染模糊综合评价

3.1 营养元素对各评价等级的隶属度

根据各采样点实测值及评价等级及对应各沉积物营养元素评价等级的隶属度函数,各个点经过计算所得的模糊关系矩阵见表 4。模糊关系矩阵体现了每个评价因子的每一分级评价标准的隶属程度,各项评价指标的隶属度大小在 0~1,隶属度数值越大表明对该分级标准的隶属程度越大。

表 4 模糊关系矩阵

编号	TN			TP			TOC		
	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级
1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0.91	0.09	1	0	0
3	1	0	0	0	0.83	0.17	1	0	0
4	1	0	0	0	0.91	0.09	1	0	0
5	1	0	0	1	0	0	1	0	0
6	0	0.98	0.02	0	0.93	0.07	1	0	0
7	1	0	0	0	0.97	0.03	1	0	0
8	0	0.99	0.01	0	0.97	0.03	1	0	0
9	0	0.99	0.01	0	0.93	0.07	1	0	0
10	0	0.84	0.16	0	0.83	0.17	0	0.97	0.03
11	1	0	0	0	0.95	0.05	1	0	0
12	1	0	0	0	0.97	0.03	1	0	0
13	1	0	0	1	0	0	1	0	0
14	1	0	0	0	0.95	0.05	1	0	0
15	1	0	0	0	0.99	0.01	1	0	0
16	1	0	0	1	0	0	1	0	0

3.2 营养元素评价因子权重

根据 1.2.3 确定的方法,计算得到各采样点评价因子权重值见表 5,评价因子在个采样点的权重值分布不均,TN 和 TOC 的权重值相对较小,表明 TN 和 TOC 对沉积物的污染贡献较小。TP 在各采样点的权重值较大,是影响渭河陕西段沉积物环境质量的主要因子,需注意渭河陕西段磷元素的外源输入。

3.3 营养元素污染模糊综合评价结果

根据 1.2.3 确定的方法通过模糊关系矩阵和权重向量求得营养元素污染模糊综合评价结果(表 6)。在渭河流域陕西段的 16 个采样点中,12 个采样点的营养元素等级为Ⅱ级,4 个采样点为Ⅰ级。干流处,在 12 个采样点中,8 个采样点的营养元素等级为Ⅱ级,4 个采样点为Ⅰ级;支流处,4 个采样点均处于Ⅱ级。综合来看,渭河陕西段

沉积物营养元素污染程度为Ⅱ级,属于最低级,即沉积物已受污染,但多数底栖生物可以承受,需加强支流处污染物处理及排放的管理。

表 5 各采样点评价因子权重值

编号	评价因子			编号	评价因子		
	TN	TP	TOC		TN	TP	TOC
1	0.25	0.62	0.13	9	0.27	0.6	0.14
2	0.17	0.74	0.09	10	0.36	0.45	0.18
3	0.08	0.87	0.04	11	0.21	0.7	0.09
4	0.09	0.86	0.04	12	0.21	0.7	0.09
5	0.22	0.68	0.11	13	0.13	0.81	0.06
6	0.29	0.58	0.13	14	0.15	0.8	0.06
7	0.17	0.72	0.12	15	0.15	0.78	0.07
8	0.28	0.59	0.13	16	0.13	0.82	0.05

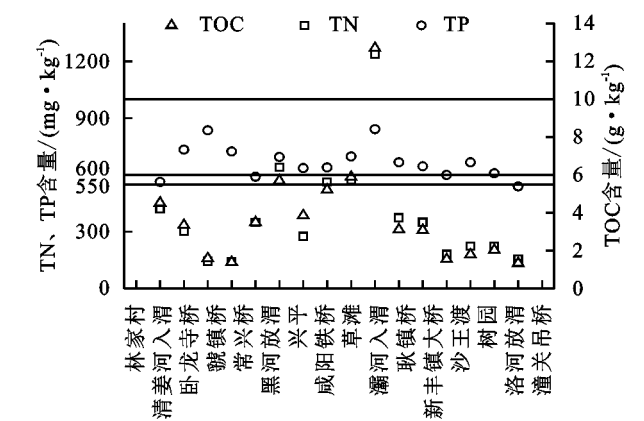
表 6 营养元素污染模糊综合评价结果

编号	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	评价等级	编号	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	评价等级
1	1	0	0	Ⅰ	9	0.14	0.82	0.04	Ⅱ
2	0.26	0.67	0.07	Ⅱ	10	0	0.86	0.14	Ⅱ
3	0.12	0.73	0.15	Ⅱ	11	0.3	0.67	0	Ⅱ
4	0.13	0.79	0.08	Ⅱ	12	0.3	0.68	0.02	Ⅱ
5	1	0	0	Ⅰ	13	1	0	0	Ⅰ
6	0.13	0.82	0.05	Ⅱ	14	0.2	0.76	0.04	Ⅱ
7	0.29	0.69	0.02	Ⅱ	15	0.22	0.77	0.01	Ⅱ
8	0.13	0.85	0.02	Ⅱ	16	1	0	0	Ⅰ

加拿大安大略省环境和能源部制定的环境质量评价标准的结果(图 4)可知,在 16 个采样点中,TOC,TN 和 TP 含量处于Ⅰ级的样点分别为 15,12,3 个,分别占总样点数的 94%,75%和 19%,可以看出单个评价因子对沉积物环境质量的影响,但 3 种评

价因子结果差异较大,难以反映评价因子的综合影响。此外,TP 含量处于Ⅰ级的样点有 3 个,均在Ⅱ级的阈值附近,简单将其划分为Ⅰ级,并不合理。单因子评价忽略了沉积物环境污染轻重程度的模糊性,通过模糊评价法计算出评价结果对应于各等级的隶

属度,可以直观全面地反映出河流沉积物质量状况,更加符合实际情况。同时,可以根据评价因子隶属度



注:图 4A 中 550 mg/kg,600 mg/kg 和 10 g/kg 分别为加拿大安大略省有机质和营养元素评价标准中Ⅱ级的阈值,图 4B 中 TOC,TN 和 TP 均为加拿大安大略省有机质和营养元素评价标准中不同污染物等级的点位百分比组成。

的大小为河流沉积物环境的治理提出合理化建议提供理论依据^[25]。

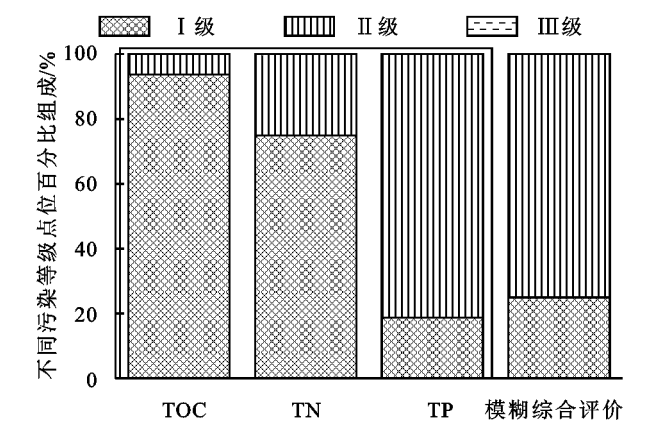


图 4 加拿大安大略省有机质和营养元素评价结果

4 结论

渭河沉积物中 TOC,TN 和 TP 含量平均值分别为 5.61 ± 4.76 g/kg, 0.64 ± 0.62 g/kg 和 0.71 ± 0.18 g/kg,均属于中等变异强度;TOC 和 TN 含量变异性相对较大,TP 含量变异相对较小。沉积物中碳氮磷含量在 2016 年较前两年均有所降低,但在汛期内无显著变化。沉积物中营养元素具有相似的沿程变化特征,在清姜河入渭处和灞河入渭处达到峰值,兴平和沙王渡处存在低谷。空间聚类分析将 16 个沉积物采样点分成 2 个聚类,聚类 1 为低污染点包括常兴桥、黑河入渭、兴平、耿镇桥、新丰镇大桥、沙王渡、树园、洛河入渭和潼关吊桥;聚类 2 为高污染点包括卧龙寺桥、虢镇桥、林家村、咸阳铁桥、草滩、清姜河入渭和灞河入渭,与人类活动以及沿岸分布的化工、机械和食品加工等工业企业分布相关。模糊综合评价结果表明,在渭河流域陕西段的 16 个采样点中,12 个采样点的营养元素等级为最低级,4 个采样点为安全级。综合来看,渭河陕西段沉积物营养元素污染程度为Ⅱ级,存在一定的生态风险,需注意磷元素的外源输入以及支流处污染物处理及排放的管理。

参考文献:

[1] Gibbs, R. J. Mechanisms of trace metal transport in rivers[J]. Science, 1973,180(4081):71-73.

[2] Kunwar P S, Amrita M, Sarita S, et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component analysis [J]. Water Air & Soil Pollution, 2005,166(1):321-341.

[3] 朱广伟,陈英旭.沉积物中有机质的环境行为研究进展[J].湖泊科学,2001,13(3):272-279.

[4] 王圣瑞,金相灿,赵海超.湖泊沉积物中水溶性有机质对吸附磷的影响[J].土壤学报,2005,42(5):103-109.

[5] 兰金秀,张风宝,杨明义.渭河中下游河道沉积物重金属污染生态风险评价[J].水土保持研究,2017,24(4):77-82.

[6] 易文利.渭河宝鸡段表层沉积物营养盐分布特征及污染评价[J].河南科学,2014,32(4):616-619.

[7] 任朝亮,宋进喜,王珍.渭河底泥有机质的空间分布及与其他污染物相关性[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):123-128.

[8] 刘建伟.南流江城市河流沉积物营养盐富集特征及污染评价研究[D].南宁:广西师范学院,2015.

[9] Mudroch A, Azcue J M. Manual of aquatic sediment sampling[M]. Crc Press, 1995.

[10] 杨洋,刘其根,胡忠军.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报,2014,34(12):3057-3064.

[11] Liu L, Zhou J, An X, et al. Using fuzzy theory and information entropy for water quality assessment in Three Gorges region, China[J]. Expert Systems with Applications, 2010,37(3):2517-2521.

[12] Gong L, Jin C. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. Water Resources Management, 2009,23(12):2505-2513.

[13] 张杰,邓晓军,翟禄新.基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J].水土保持研究,2018,25(5):385-389,96.

[14] 柴雪柯,高鹏,蒋观滔.渭河流域降雨侵蚀力时空变化研究[J].水土保持研究,2016,23(3):25-28,36.

[15] 陈博.渭河干流陕西段水资源保护理论及对策研究[D].西安:长安大学,2013.

[16] 裴廷权,王里奥,韩勇.三峡库区小江流域水体富营养化的模糊评价[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1427-1431.