

渭河陕西段河道沉积物中碳氮磷来源分析及污染评价

何琪琳^{1,3}, 张风宝^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(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)

摘要: 基于渭河陕西段及其支流河道 16 个采样点中沉积物的总氮(TN)、总磷(TP)和总有机碳(TOC)含量,运用 C/N 和 N/P 比值法研究沉积物中营养元素的可能来源,并采用有机污染指数法评价沉积物污染状况。结果表明,沉积物中 TN 含量为 0.069~3.839 g/kg,66.1% 的样品含量低于平均值 0.639 g/kg;TP 含量为 0.453~1.841 g/kg,62.7% 的样品含量低于平均值 0.713 g/kg;TOC 含量为 0.772~25.221 g/kg,62.3% 的样品含量低于平均值 5.609 g/kg。渭河陕西段沉积物中有机质主要受内源影响,以藻类和浮游动植物为主;沉积物中磷的来源主要为外源输入。2014—2016 年所有采样点的 N/P 值均小于 Redfield 比,这可能与沉积物中碳氮磷的生物地球化学过程有关。2016 年 11 月,在局部河道如林家村、卧龙寺桥、常兴桥、兴平、草滩、清姜河入渭处可能受到外源有机质的影响。2015 年内有机指数与有机氮指数变化一致,即汛前<汛中<汛后。在 2014—2016 年,渭河陕西段沉积物中有机氮污染和有机污染整体上得到有效控制,但在局部河道如咸阳铁桥、草滩、黑河入渭和灞河入渭处等距离城市较近区域存在污染反弹可能,需引起注意。

关键词: 渭河; 沉积物; 氮; 磷; 有机质; 来源

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0050-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.008

Source Analysis and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in River Sediments of the Weihe River in Shaanxi Province

HE Qilin^{1,3}, ZHANG Fengbao^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(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; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) in 16 sampling points of the Weihe River and its tributary channels were studied, and the possible sources of sediments were studied by C/N and N/P ratio methods. The status of sediment pollution is evaluated by the organic pollution index method. The study shows that the TN content in the sediment is between 0.069~3.839 g/kg, 66.1% of sample content is below the average 0.639 g/kg; the TP content is between 0.453~1.841 g/kg, 62.7% of sample content is below the average 0.713 g/kg; TOC content is between 0.772~25.221 g/kg, 62.3% of sample content is below the average value of 5.609 g/kg. The organic matter in the sediments of the Weihe River in Shaanxi Province is mainly affected by endogenous sources, and is dominated by algae and phytoplankton. The source of phosphorus in sediments is mainly external input. The N/P values of all sampling points from 2014 to 2016 were less than the Redfield ratio, which may be related to the biogeochemical processes of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments. In November 2016, there were external sources of organic matter in partical rivers such as Linjia Village, Wolongsi Bridge, Changxing Bridge, Xingping, Caotan and Qingjiang River. In 2015, the organic index and the organic nitrogen index

收稿日期:2019-08-09

资助项目:陕西省水利科技计划项目(2013slkj-11)

第一作者:何琪琳(1995—),女,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,研究员,主要从事坡面土壤侵蚀机理研究。E-mail:fbzhang@nwsuaf.edu.cn

changed in the same period, namely before the flood<during the flood< after the flood. From 2014 to 2016, the sediment organic nitrogen pollution and organic pollution in Shaanxi section of Weihe River have been effectively controlled as a whole, but there is a possibility of pollution rebound in some partial rivers near the city such as: Xianyang Iron Bridge, Caotan, Heihe River and Bahe river which needs attention.

Keywords: WeiheRiver; sediments ; nitrogen; phosphorus; organic matter; source

氮、磷是生物生长的必需营养元素,输入到水体中的氮、磷等营养物质,一部分被水生生物吸收利用,一部分以各种形式存在于水中,大部分则通过物理、化学、生物作用沉降到水体底部,经过长期积累,在河流底部形成“淤泥”^[1-2]。河流沉积物是各种营养物质的源与汇,记录着河流环境变化的丰富信息,其中营养盐含量是河流富营养化过程的标志^[3-4]。因此,河流沉积物碳氮磷含量状况是评价水环境健康的一个重要指标^[5]。近年来,随着社会经济的发展,渭河流域人类活动强烈,大量生产、生活污水使河流污染负荷加重、水质恶化,导致渭河流域生态环境发生改变^[6-7]。诸多学者^[8-12]对渭河流域沉积物中营养盐的分布规律、生物地球化学循环、污染评价及其来源进行了研究,取得了一定的进展,但现有研究中选取采样点数量偏少,且样点间距离较大,缺乏连续性的研究。因此,本文在渭河陕西段设置了 16 个采样点,分别在 2014 年(1 次)、2015 年(3 次)和 2016(1 次)年进行了 5 次采样,分析渭河陕西段沉积物中 TN、TP 和 TOC 含量的总体变化特征,探讨渭河陕西段沉积物营养元素的可能来源,评价渭河陕西段沉积物污染状况,为渭河河道生态系统的恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河流域地处陕西中部,是黄河的最大支流,发

源于甘肃省渭源县鸟鼠山,自西向东流经甘肃、宁夏、陕西 3 省(区)26 个县(市),在潼关注入黄河^[13]。渭河流域干流全长 818 km,流域总面积为 13.5×10^4 km²,流经陕、甘、宁三省区。其中陕西境内流长 512 km,流域面积 6.71×10^4 km²,占渭河流域总面积的 50%,包括宝鸡、杨凌、咸阳、西安、渭南、铜川、延安、榆林等地^[6]。渭河流域的发展对陕西的发展具有重要意义,渭河灌溉农田近 9.33×10^5 hm²,流域集中了陕西 65%的生产总值,接纳了全省 78%的工业废水和 86%的生活污水^[7]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 渭河流域降水相对集中在 6—9 月,占全年降水量的 60%左右,夏季暴雨最早出现在 4 月,最迟在 10 月,最大降雨日数多出现在 8 月^[14-15]。同时考虑到河道沉积物的冲淤变化及不同时间尺度的可对比性,本文在 2014 年、2015 年和 2016 年进行了 5 次采样,分别为 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。依据陕西省河流省界水质监测断面的布置,结合河段特点,特别是支干流排污口的分布情况以及流经主要城市,设置 16 个采样断面(表 1、图 1)。每个采样断面设置 3~5 个采样点,在每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,装入洁净的密封袋中,排去袋中空气,带回实验室分析。

表 1 渭河陕西段沉积物采样点坐标

编号	采样断面	经度	纬度	编号	采样断面	经度	纬度
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′02.00″	34°21′37.00″	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 样品分析与测定 将样品在室温阴凉处自然风干后采用玻璃棒压散,剔除砾石、动植物残体等杂质,研磨后过 100 目筛。沉积物中 TN 含量采用高氯酸—硫酸消化法(LY/T 1228—1999)测定,沉积物中 TP 含量采用酸熔—钼锑抗比色法(LY/T 1232—1999)测定,沉积物中 TOC 含量采用重铬酸钾氧

化—外加热法(LY/T 1237—1999)测定^[16]。
1.2.3 沉积物污染评价方法 采用有机污染指数法^[17-18]进行污染状况评价。有机指数常用来评价水域沉积物的环境状况,有机氮则是衡量河流湖泊表层沉积物是否遭受氮污染的重要指标,计算方法见公式(1)和公式(2),具体标准见表 2。

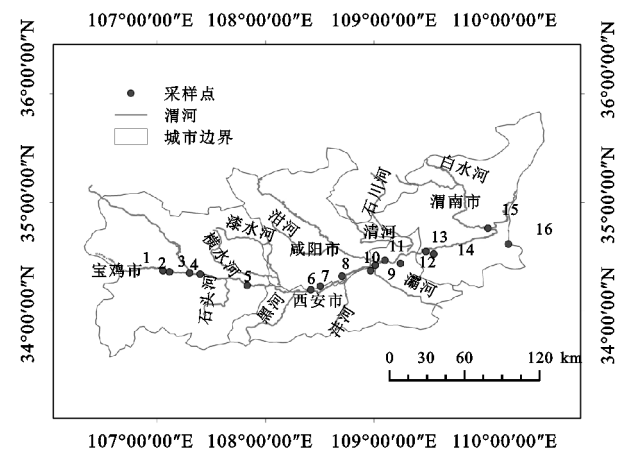


图 1 渭河陕西段沉积物采样点分布

有机氮:有机氮%=总氮%×0.95 (1)

有机指数:有机指数=有机碳%×有机氮% (2)

表 2 沉积物有机氮和有机指数评价标准			
有机氮/%	等级类型	有机指数	等级类型
<0.033	清洁Ⅰ	<0.05	清洁Ⅰ
0.033~0.066	较清洁Ⅱ	0.05~0.20	较清洁Ⅱ
0.066~0.133	尚清洁Ⅲ	0.20~0.50	尚清洁Ⅲ
>0.133	有机氮污染Ⅳ	>0.50	有机污染Ⅳ

采用 Excel 2016 软件和 SPSS 20 软件对数据进行统计分析和处理,采用 Origin 9.0 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 碳氮磷含量总体变化特征

不考虑时空变化情况下,渭河陕西段沉积物中碳氮磷含量见图 2。沉积物中 TN 含量为 0.069~3.839 g/kg,66.1% 的样品含量低于平均值 0.639 g/kg;TP 含量为 0.453~1.841 g/kg,62.7% 的样品含量低于平均值 0.713 g/kg;TOC 含量为 0.772~25.221 g/kg,62.3% 的样品含量低于平均值 5.609 g/kg。TN、TP、TOC 含量变异系数分别为 0.967,0.256 和 0.848,均属于中等变异(0.1~1),但 TP 含量变异性相对较小。依据 Shapiro-Wilk (S—W)正态分布检验概率检验,表明 TN、TP 和 TOC 含量均符合正态分布。沉积物中碳氮磷含量在 2016 年 11 月与前 2 年同期相比有所降低,且均在清姜河入渭处和灞河入渭处达到峰值。

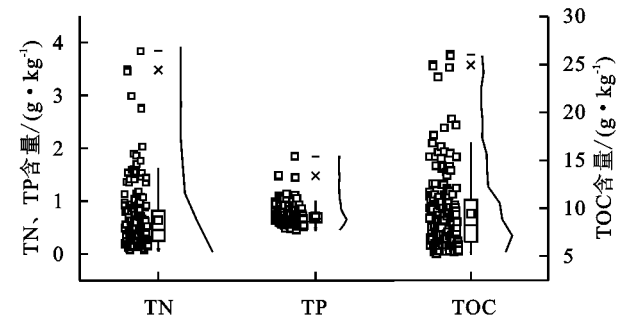


图 2 TN、TP、TOC 含量基本统计特征分析

与已有渭河流域沉积物中营养物质含量的研究

(表 3)相比较,本研究中整个渭河陕西段沉积物 TN、TP 和 OM 含量与高赞^[12]在 2016 年 8 月于渭河渭源段的研究相比含量较低,主要是高赞^[12]根据河道特点并结合村镇分布情况选择采样点,部分采样点处于县城,周边有垃圾填埋场和种植中药材的农田,采样点处营养物质含量水平相对较高。本研究与张台凡等^[8]在 2013 年 6,12 月于渭河陕西段 0—10 cm 层沉积物中 TN、TP 含量(数据使用 GetData 软件获得)相比较低,张台凡等^[8]的研究选取宝鸡市眉县、咸阳市、西安市草滩镇、西安市临潼区和渭南市华县 5 个研究点,研究点较少,且靠近城市。本研究中 TP、OM 含量与易文利^[9]在渭河宝鸡段的研究相差不大,TN 含量较低,且在沿程分布上相似,均在卧龙桥寺处达到峰值。本研究与石苗^[10]的研究在 2015 年 4,9 月于渭河陕西段的研究相比较低,可能与汛期内径流变化及动植物生长发育有关。4 月降雨量和径流量小,渭河输沙量低,沉积物不断淤积未随水流迁移。9 月正值夏季,水生动植物快速生长繁殖,代谢产物及动植物残体沉降,导致沉积物中的碳氮磷含量增加。本研究中 OM 含量与任朝亮等^[11]在 2011 年 10—11 月于渭河陕西段的研究相比偏高,可能与采样点的分布有关,且任朝亮等^[11]的研究在咸阳、临潼和华县 3 个采样点 OM 含量波动较大。OM 含量沿程变化特征与本研究一致,在咸阳处达到峰值。总体来说,本研究中 TP、OM 含量与其他研究相差不大,TN 含量平均值与其他研究相比较低,但其变化范围大体一致。

2.2 沉积物 TN、TP 和有机质来源分析

沉积物中有机质主要来源于河流中动植物残体的迁移和沉积,有机残体在分解及矿化过程中,不断与水体发生交换,逐渐沉积于沉积物中^[19]。不同来源沉积物的碳氮比(C/N)具有明显的差异性,可以用来判别有机质的类型及来源。一般认为,当 C/N>10 时,沉积物中有机质以外源为主,C/N<10 时,以内源有机质为主,C/N≈10 时,外源与内源有机质基本达到平衡状态^[20]。此外,不同的生物种类 C/N 比也存在差异性,高等植物 C/N 为 14~23,藻类为 5~14,水生生物为 2.8~3.4,浮游动植物为 6~13^[21]。

为了明确渭河陕西段沉积物中有机质的来源,本研究统计了 2014—2016 年中沉积物的 C/N 值(表 4)。2015 年汛前 C/N 值变化范围为 7.20~12.75,平均值为 9.50;2015 年汛中 C/N 值变化范围为 7.25~10.56,平均值为 8.66;2015 年汛后 C/N 值变化范围为 6.13~12.83,平均值为 8.24。在汛期内,各采样断面的 C/N 值变化较大,对汛前、汛中、汛后的碳氮比进行 U 检验,显著性为

0.037,表明 2015 年汛期内碳氮比具有显著差异。可能与汛期渭河径流量明显改变有关,沉积物上覆水对沉积物的冲刷、混匀作用加强,使表层沉积物随水流发生迁移、沉积,C/N 值发生显著变化。2014 年 11 月 C/N 值变化范围为 6.87~13.09,平均值为 10.07;2015 年 11 月 C/N 值变化范围为 6.13~12.83,平均值为 8.24;

表 3 渭河陕西段沉积物养分含量水平综合对比

渭河 区域	采样时间 (年—月)	TN/(g·kg ⁻¹)		TP/(g·kg ⁻¹)		OM/%		数据来源
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
陕西段	2014—2016 年	0.07~3.84	0.64	0.45~1.84	0.71	1.33~43.48	1.25	本研究
渭源段	2016—08	1.05~3.25	2.11	1.13~2.55	1.49	3.47~4.90	4.58	高赞 ^[12]
陕西段	2013—06	5.40~10.59	7.95	13.26~25.78	20.02			张台凡等 ^[8]
	2013—12	1.30~8.72	3.21	6.15~8.74	7.47			
宝鸡段		0.31~3.55	1.64	0.53~1.00	0.74	0.38~1.70	1.46	易文利 ^[9]
陕西段	2015—04	4.28~8.85	7.51	0.52~1.74	0.96	1.20~5.59	3.09	石苗 ^[10]
	2015—09	5.47~15.14	10.27	0.37~2.84	1.61	1.66~8.57	4.67	
陕西段	2011—10—11					1.03~8.94	0.70	任朝亮等 ^[11]

表 4 2014—2016 年渭河陕西段中沉积物的 C/N 值

采样断面	2014 年 11 月 (汛后)	2015 年 5 月 (汛前)	2015 年 8 月 (汛中)	2015 年 11 月 (汛后)	2016 年 11 月 (汛后)
林家村	11.39	12.75	8.39	7.91	10.76
卧龙寺桥	8.44	9.95	8.15	9.27	11.15
虢镇桥	11.18	8.49	9.15	7.03	9.86
常兴桥	9.47	8.74	7.44	7.64	10.04
兴平	11.31	8.70	9.48	7.62	14.04
咸阳铁桥	13.09	7.20	8.64	6.31	9.28
草滩	10.13	7.46	8.16	8.22	10.29
耿镇桥	8.95	8.43	8.82	7.75	8.33
新丰镇大桥	6.87	8.93	7.75	7.29	8.81
沙王渡	9.14	9.05	8.70	6.13	8.52
树园	9.77	11.11	7.25	9.62	8.04
潼关吊桥	9.48	12.06	10.06	8.24	8.59
清姜河入渭	11.19	9.94	8.23	12.83	11.11
黑河入渭	11.10	9.54	10.56	7.76	8.90
灞河入渭	10.48	8.27	8.39	9.08	10.27
洛河入渭	9.22	11.38	9.37	9.14	9.09

表层沉积物中 N、P 含量及比值通常为沉积物吸附与释放营养元素 2 种动态过程的综合反映,从某种程度上可反映河流沉积物的富营养状态^[22]。N/P 小于 Redfield 比(C : N : P 为 106 : 16 : 1),表示沉积物中磷主要为周边环境外源输入^[23]。2014 年 11 月 N/P 值变化范围为 6.87~13.09,平均值为 10.07;2015 年汛前 N/P 值变化范围为 0.12~2.36,平均值为 0.90;2015 年汛中 N/P 值变化范围为 0.29~2.17,平均值为 1.00;2015 年汛后 N/P 值变化范围为 0.31~3.01,平均值为 1.14;2016 年 11 月 N/P 值变化范围为 0.22~6.02,平均值为 1.79。综上所述,渭河陕西

2016 年 11 月 C/N 值变化范围为 8.04~14.04,平均值为 9.82。综上所述,表明在渭河陕西段沉积物中有机质主要受内源影响,以藻类和浮游动植物为主。2016 年 11 月,在部分采样点如林家村、卧龙寺桥、常兴桥、兴平、草滩、清姜河入渭处 C/N>10,表明该区域可能受到外源有机质的影响。

段沉积物中磷主要为外源输入。2014—2016 年所有采样断面的 N/P 值(表 5)均小于 Redfield 比(C : N : P 为 106 : 16 : 1),这可能与沉积物中碳氮磷的生物地球化学过程有关,在沉积物—水界面生物化学反应剧烈,通过降解和成岩作用,沉积物中碳和氮以气体的形式逸出,而磷富集在沉积物中^[22]。

表 5 2014—2016 年渭河陕西段中沉积物的 N/P 值

采样断面	2014 年 11 月 (汛后)	2015 年 5 月 (汛前)	2015 年 8 月 (汛中)	2015 年 11 月 (汛后)	2016 年 11 月 (汛后)
林家村	0.76	0.43	1.35	1.72	1.78
卧龙寺桥	0.99	0.27	2.17	0.84	3.69
虢镇桥	0.30	0.67	1.20	1.08	0.44
常兴桥	1.08	0.18	0.72	1.48	6.02
兴平	0.51	0.93	0.63	0.31	0.54
咸阳铁桥	0.28	0.95	1.01	1.60	0.29
草滩	0.39	1.76	1.19	0.80	0.22
耿镇桥	1.01	0.70	0.29	1.26	1.44
新丰镇大桥	2.36	0.63	0.56	0.60	3.76
沙王渡	1.19	0.56	0.35	0.83	2.12
树园	0.83	0.54	0.48	1.17	1.55
潼关吊桥	0.75	0.45	0.98	0.93	1.67
清姜河入渭	1.42	1.11	1.24	0.86	1.28
黑河入渭	0.78	0.37	0.62	1.14	2.12
灞河入渭	1.66	1.17	1.94	3.01	1.42
洛河入渭	0.12	0.57	1.26	0.68	0.22

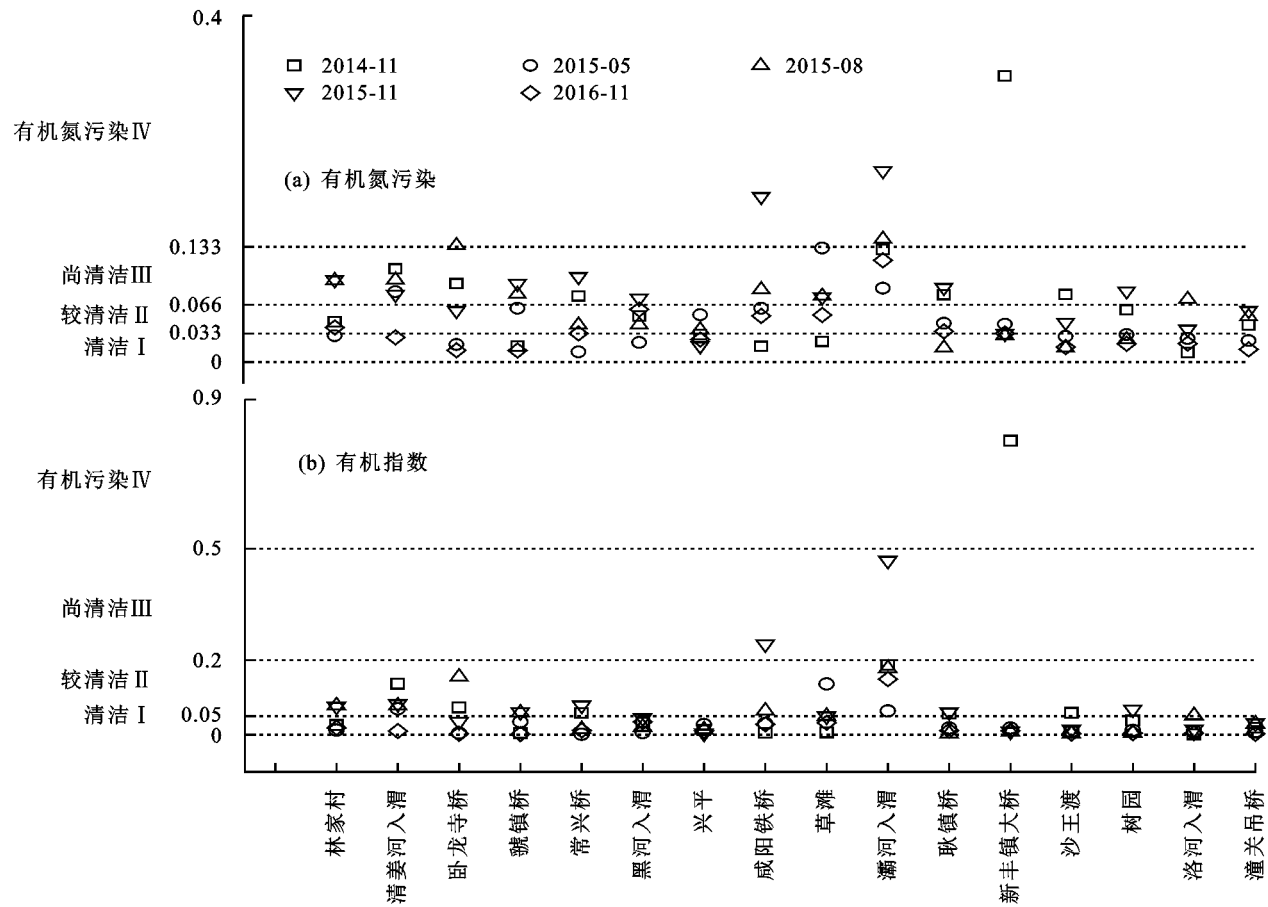
2.3 渭河流域沉积物的污染状况

根据有机指数和有机氮评价方法和标准,对渭河沉积物的污染状况进行评价(图 3)。2015 年汛前有机氮指数变化范围为 0.012%~0.132%,平均值为 0.048%,属于较清洁Ⅱ;2015 年汛中有机氮指数变化范围为 0.016%~0.142%,平均值为 0.065%,属于

尚清洁Ⅲ；2015 年汛后有机氮指数变化范围为 0.019%~0.221%，平均值为 0.084%，属于尚清洁Ⅲ；2015 年汛期有机氮指数增大，即汛前<汛中<汛后，可能与汛后河流携带含氮磷等有机物的泥沙沉积有关。2014 年 11 月有机氮指数变化范围为 0.011%~0.330%，平均值为 0.075%，属于尚清洁Ⅲ；2015 年汛后有机氮指数变化范围为 0.019%~0.221%，平均值为 0.084%，属于尚清洁Ⅲ；2016 年 11 月有机氮指数变化范围为 0.013%~0.117%，平均值为 0.037%，属于较清洁Ⅱ。从有机氮指数平均值来看，2014—2016 年，渭河陕西段沉积物有机氮污染得到有效控制。2016 年 11 月在咸阳铁桥、草滩、黑河入渭和灞河入渭处与同期其他采样点相比，有机氮指数较大。自 2011 年实施的企业治理减排、农业结构调整与综合治理项目大大减少了外源污染物的输入量，对渭河流域沉积物环境

质量起到持续改善作用。

2015 年汛前有机指数变化范围为 0.001~0.136，平均值为 0.028，属于清洁Ⅰ；2015 年汛中有机指数变化范围为 0.002~0.178，平均值为 0.051，属于较清洁Ⅱ；2015 年汛后有机指数变化范围为 0.003~0.178，平均值为 0.467，属于较清洁Ⅱ；2015 年汛期内有机指数与有机氮指数变化一致，即汛前<汛中<汛后。2014 年 11 月有机指数变化范围为 0.001~0.789，平均值为 0.094，属于清洁Ⅰ；2015 年 11 月有机指数变化范围为 0.003~0.178，平均值为 0.467，属于较清洁Ⅱ；2016 年 11 月有机指数变化范围为 0.002~0.149，平均值为 0.021，属于清洁Ⅰ。从有机指数平均值来看，在 2014—2016 年，渭河陕西段沉积物有机污染较轻。2016 年 11 月在灞河入渭处与同期其他采样点相比有机污染较严重。



注：图中 0.133,0.066,0.033 为有机氮污染评价等级阈值；0.5,0.2,0.05 为有机指数评价等级阈值。

图 3 有机指数法沉积物污染状况评价

对各采样点进行周边环境分析，咸阳铁桥处排污口数量多，且污染物浓度高，河流流速较快，沉积物—水界面营养元素迁移转化速率增大。草滩是土壤侵蚀泥沙淤积地，汛期后大量泥沙淤积。黑河入渭处河岸较窄，水流较小，沉积物对含氮磷有机化合物吸附作用较大。在灞河入渭处人口密集，大量含氮、磷、有机化合物的生活污水流入。表明沉积物污染状况与

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。在渭河陕西段局部河道如咸阳铁桥、草滩、黑河入渭和灞河入渭处等距离城市较近区域存在污染反弹可能，需引起注意。

3 结论

(1)沉积物中 TN 含量为 0.069~3.839 g/kg,66.1% 的样品含量低于平均值 0.639 g/kg; TP 含量为 0.453~

1.841 g/kg,62.7%的样品含量低于平均值 0.713 g/kg;TOC 含量为 0.772~25.221 g/kg,62.3%的样品含量低于平均值 5.609 g/kg。变异系数为 0.256~0.967,均属于中等变异;整体上沉积物中 TP 含量变异相对较小,TN、TOC 含量变异性相对较大。

(2)渭河陕西段沉积物中有机质主要受内源影响,且以藻类和浮游动植物为主。2016 年 11 月,在局部河道如林家村、卧龙寺桥、常兴桥、兴平、草滩、清姜河入渭处可能受到外源有机质的影响。在沉积物中磷主要为外源输入,2014—2016 年所有采样断面的 N/P 值均小于 Redfield 比,这可能与沉积物中元素的生物地球化学过程有关。

(3)2015 年汛期内有有机指数与有机氮指数变化一致,即汛前<汛中<汛后。在 2014—2016 年,渭河陕西段沉积物有机氮污染和有机污染得到有效控制,但在局部河道如咸阳铁桥、草滩、黑河入渭和灞河入渭处等距离城市较近区域有反弹的可能,需引起注意。

参考文献:

[1] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等.南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J].湖泊科学,2007,19(4):390-396.

[2] 王亚琼,薛培英,耿丽平,等.白洋淀沉积物—沉水植物—水系统氮、磷分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):304-309.

[3] 王天阳,王国祥.昆承湖沉积物中重金属及营养元素的污染特征[J].环境科学研究,2008,21(1):51-58.

[4] 颜永毫,周杰,何忠,等.3 万年来卤阳湖沉积物地球化学元素变化特征及其环境意义[J].水土保持学报,2016,30(3):208-212.

[5] 李如忠,洪齐齐,罗月颖.巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J].环境科学研究,2010,23(2):144-151.

[6] 彭殿宝,周孝德.渭河流域(陕西段)水体现状及水污染综合治理研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):128-131.

[7] 胡德秀,李立,张艳,等.渭河干流陕西段综合治理前后的水

(上接第 49 页)

[21] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.浑水膜孔灌入渗影响因素[J].排灌机械工程学报,2017,35(2):178-184.

[22] 范严伟,马孝义,王波雷,等.膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(11):35-41.

[23] 许尊秋,毛晓敏,陈帅.层状土层序排列对水分运移影响的室内土槽试验[J].中国农村水利水电,2016(8):59-62.

质变化与趋势[J].水土保持通报,2018,38(5):91-96.

[8] 张台凡,宋进喜,杨小刚,等.渭河陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究[J].环境科学学报,2015,35(5):1393-1399.

[9] 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.

[10] 石苗.渭河陕西段底泥释放规律及其对水质的影响研究[D].西安:西安理工大学,2016.

[11] 任朝亮,宋进喜,王珍,等.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.

[12] 高赞.渭河渭源段河道沉积物盐类分析[J].中国水土保持,2018(2):60-63.

[13] 陈广圣,邓云龙.渭河流域径流变化规律分析[J].吉林水利,2014(12):31-34.

[14] 万红莲,张英.渭河陕西段水情对气候变化的响应[J].江西农业学报,2012,24(1):169-172.

[15] 陶望雄,马亚鑫,张杰,等.渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2016,36(6):110-114.

[16] 刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-47.

[17] 刘鹤,孟婷,程文等.汤浦水库沉积物碳、氮、磷的分布与评价[J].水土保持通报,2017,37(2):333-338.

[18] 张晓晶,李畅游,张生,等.乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1770-1776.

[19] 沈丽丽,何江,吕昌伟,等.哈素海沉积物中氮和有机质的分布特征[J].沉积学报,2009,28(1):158-165.

[20] 刘锐,马腾,邱文凯,等.淤泥沉积物中有机碳的环境意义[J].环境科学与技术,2019,42(1):184-192.

[21] 蔡金榜,李文奇,刘娜,等.洋河水库底泥污染特性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):886-893.

[22] 王书锦.罗时江河口湿地沉积物碳氮磷时空分布规律及潜在生态风险研究[D].昆明:西南林业大学,2017.

[23] 李强,霍守亮,王晓伟,等.巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J].环境工程技术学报,2013,3(2):147-155.

[24] Priyank G, Javed A, Mohammad M. Influence of thickness and position of the individual layer on the permeability of the stratified soil[J].Perspectives in Science,2016,8:757-759.

[25] 周文,曹琳,王锦辉.浑水膜孔灌单向交汇入渗特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(7):627-633.

[26] 费良军,朱兴华,吴军虎.膜孔灌多向交汇入渗减渗特性和数学模型研究[J].水利学报,2006,37(1):104-108.