

镇江市古运河河岸沉积物氮及有机质分布特征

周裔文, 周晓红, 任琪琪, 李义敏, 林志军, 冯德友, 韩 珏

(江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要:为揭示镇江市古运河河岸表层沉积物中氮元素含量的分布特征,结合古运河周边环境状况,选择6个典型的采样点对其表层沉积物进行样品采集,对各样品沉积物总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)以及有机质(OM)和pH值进行了分析,并根据经验公式对沉积物有机氮进行了计算。结果表明,TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 以及Org-N含量介于0.39~2.40 g/kg,1.63~11.31 mg/kg,2.46~6.95 mg/kg,0.54~2.29 mg/kg,0.99~2.32 g/kg,总氮和有机氮的变异系数最大,为83.59%,氨态氮、硝态氮以及亚硝态氮的变异系数介于40.36%~49.15%,表现为中等离散程度,表明研究区域总氮和有机氮的离散程度较高,其在空间分布上呈现较为明显的异质性;古运河沉积物有机质含量介于0.99%~2.32%,变异系数为32.50%,表现为中等变异性,表明各采样点的沉积物有机质含量变化幅度中等;通过沉积物C/N值来判断,古运河有机质主要以陆源贡献为主;相关性分析结果表明, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与TN的关系最为密切,而氨氮与硝氮、亚硝氮以及有机氮之间的相关性不强,说明氨氮与其他形态氮在沉积物方式上存在一定的差异性。此外,pH值对古运河表层沉积物氮形态的具有较为显著的影响。

关键词:氮;有机质;分布特征;河岸沉积物;古运河

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0313-06

Distribution Characteristics of Nitrogen and Organic Matter in Riverside Surface Sediments of the Ancient Canal in Zhenjiang City

ZHOU Yiwen, ZHOU Xiaohong, REN Qiqi, LI Yimin, LIN Zhijun, FENG Deyou, HAN Xu

(School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to reveal distribution characteristics of nitrogen and organic matter in riverside surface sediments of the Ancient Canal in Zhenjiang, we selected six sampling sites in the riverside of Ancient Canal, and took the sediment samples from the sites. Total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) and organic matter (OM) of the samples were measured, and organic nitrogen (Org-N) was calculated according to the empirical formula. The results showed that the contents of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and Org-N ranged from 0.39 to 2.40 g/kg, from 1.63 to 11.31 mg/kg, from 2.46 to 6.95 mg/kg, from 0.54 to 2.29 mg/kg, and from 0.99 to 2.32 g/kg. The coefficient of variation (C. V) was highest for TN and Org-N (83.59%), followed by $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (40.36%~49.15%), indicating that the TN and Org-N obviously varied among the sampling sites. The content of organic matter ranged from 0.99% to 2.32% and its coefficient of variation was 32.50%, indicating that the content of organic matter moderately varied among the sampling sites. According to the C/N values, the source of organic matter in the Ancient Canal of Zhenjiang is mainly dominated by the terrigenous pollutants. Correlation analysis results show that there is the closest relation between $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and TN, whereas the correlation relation between $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, Org-N were not significant, indicating that there were certain differences of ammonia nitrogen and other forms of nitrogen in the sediment. In addition, the pH value of the ancient canal had very significant effect on the forms of surface sediment nitrogen.

Keywords: nitrogen; organic matter; distribution characteristics; riverside sediments; ancient canal

氮是水生生态系统的主要营养元素,被认为是水生生态系统初级生产力的关键性制约因子^[1-3],其在营养元素循环中占有极重要的地位,是水体富营养化的主要控制元素之一。一般而言,水环境中氮素的来源可分为外源性氮和内源性氮。其中,沉积物充当着水体中氮素“源”和“汇”的双重角色^[4-5],由于沉积物和上覆水间的总氮存在着一个明显的浓度梯度,两者间氮的平衡和转化主要是通过发生在沉积物—水体界面的硝化和反硝化作用进行调节的^[6],在一定环境条件下,沉积物中氮通过对流、扩散和再悬浮等方式向上覆水中进行迁移和释放^[7-10]。如岳维忠等^[11]研究表明, NH_4^+-N 的扩散方向主要从沉积物到上覆水,并最终导致水体大部分 TN 的再生,蒋小欣等^[12]则发现氮营养盐含量低的上覆水体有利于沉积物中氮特别是氨氮的释放。可见,沉积物中氮素含量以及其分布特征直接决定着沉积物与上覆水之间氮素的交换过程,所以沉积物是水体中氮的重要蓄积库,沉积物中氮素的迁移转化过程将在很大程度上影响着水体的富营养化状态及其后续的发展^[13-14]。沉积物中氮素的释放对河流水质的影响也因此成为当前的国际热点研究问题。

目前,城市内河河流黑臭问题已经受到人们的广泛关注,生产和生活等外源性的污染物进入河流中,使得一些城市内河水质受到较严重的污染。而城市内河受降雨、水位调控、季节变化等因素的影响,河岸带多处于水位消涨的动态变化过程中^[15]。另外河岸带又容易受人类活动的影响,不仅外源性的污染物容易堆积在河岸带,而且内源性的污染物质容易受风浪的影响沉积在河岸带,从而使得河岸带沉积物的营养盐含量与河道沉积物中的营养盐有一定的差异^[15]。然而,目前对河岸带表层沉积物的研究较少,对河岸带表层沉积物中氮元素的分布特征进行研究,为城市内河河岸带的综合治理和生态保护提供理论依据,也有利于发挥城市内河河岸带的景观价值,具有重要意义。因此,本研究以镇江市古运河为研究区域,分析了不同采样点的沉积物氮素含量以及分布情况,以期古运河富营养化的预防及防治提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

研究区域位于古运河镇江段,该河段全长 16.69 km,平均水深 4~6 m,流经镇江市,是镇江市老城区最大的受纳水体^[15-16],是镇江老城区以及官塘、丁卯、丹徒、谏壁等地表径流以及南部山丘洪水的主要汇入河流。在前期调研基础上^[15-16],选择古运河干流及其支流

共 6 个采样点进行样品采集,各采样点位见图 1。

采用沉积物采样器分别采集河岸带(水—岸交错区)各采样点的表层沉积物,每个点位采集沉积物各 3 次,充分混合后迅速保存于聚乙烯自封袋里(排出空气),运回实验室后,低温保存,并通过冷冻干燥仪于 -45°C 冷冻干燥(LGJ-12 压差型,北京松源华兴科技发展有限公司),后用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛,自封袋封装后保存备用。

1.2 样品的测定

沉积物 pH 值采用 pH 值计测定;有机质采用水合热重铬酸钾氧化—比色法测定;沉积物总氮采用半微量凯氏定氮法测定。沉积物样品通过 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提后,分别用靛酚蓝比色法,酚二磺酸比色法和紫外分光光度计法测定氨氮(NH_4^+-N),硝氮(NO_3^--N),亚硝氮(NO_2^--N)的含量。每个样品平行测定 3 次。

1.3 数据分析

采用 Excel 2015 对试验数据进行处理与分析,利用 SPSS 19.0 对沉积物氮、有机质含量及其与沉积物理化因子做 Pearson 相关性分析。

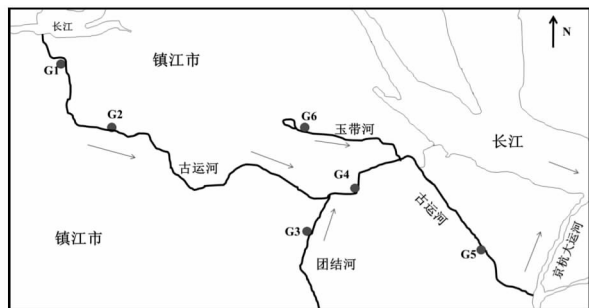


图 1 采样点示意图

2 结果与分析

2.1 古运河沉积物氮素的变化特征分析

古运河河岸表层沉积物 TN, NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N 以及 Org-N 含量介于 0.39~2.40 g/kg, 1.63~11.31 mg/kg, 2.46~6.95 mg/kg, 0.54~2.29 mg/kg, 0.99~2.32 g/kg, 平均值分别为 0.91 g/kg, 7.01 mg/kg, 4.52 mg/kg, 1.30 mg/kg 和 0.86 g/kg(表 1),从变异系数值可判断出(弱变异性: $\text{CV} < 10\%$; 中等变异性: $\text{CV} = 10\% \sim 100\%$; 强变异性: $\text{CV} > 100\%$)^[17],古运河沉积物不同形态氮的变异系数介于 40.36%~83.59%,总体表现为中等变异性,其中总氮和有机氮的变异系数最大,为 83.59%,体现出古运河河岸沉积物总氮和有机氮的离散程度较高,表明 TN, Org-N 在各采样点的含量差异较大,沉积物氨态氮、硝态氮以及亚硝态氮的变异系数介于 40.36%~49.15%,表现为中等离散程度。

表 1 古运河河岸带表层沉积物不同形态氮含量统计

项目	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	Org-N/ (g·kg ⁻¹)	OM/ %
平均值	7.01	4.52	1.30	0.91	0.86	1.74
最小值	1.63	2.46	0.54	0.39	0.37	0.99
最大值	11.31	6.95	2.29	2.40	2.28	2.32
标准偏差	3.27	1.82	0.64	0.76	0.72	0.57
变异系数/%	46.67	40.36	49.15	83.59	83.59	32.50

此外,古运河河岸表层沉积物不同形态氮在空间上分布不均匀(图 1),TN 在各采样点的变化顺序为 $G_6>G_3>G_5>G_2>G_4>G_1$,氨氮在各采样点则表现为 $G_3>G_2>G_1>G_5>G_4>G_6$ 的变化顺序。对各形态氮所占比例进行计算后发现,各形态氮占总氮的比例顺序为:Org-N>NH₄⁺-N>NO₃⁻-N>NO₂⁻-N,表明有机氮为古运河沉积物氮的主要赋存形态,而无机氮在古运河沉积物氮中所占比例较少,仅占总氮的

0.01%~0.21%。本研究中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 以及 NO₂⁻-N 占总氮的比例为 0.07%~1.97%,0.14%~1.63%,0.10%~0.29%,平均值分别为 1.18%,0.78%,0.17%。此外,以上 3 个形态氮分别占无机氮的 1.36%~39.35%,2.80%~32.61%,1.91%~5.83%,平均值分别为 23.66%,15.69%,3.37%,表明 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 在古运河沉积物无机态氮中所占比例相当。

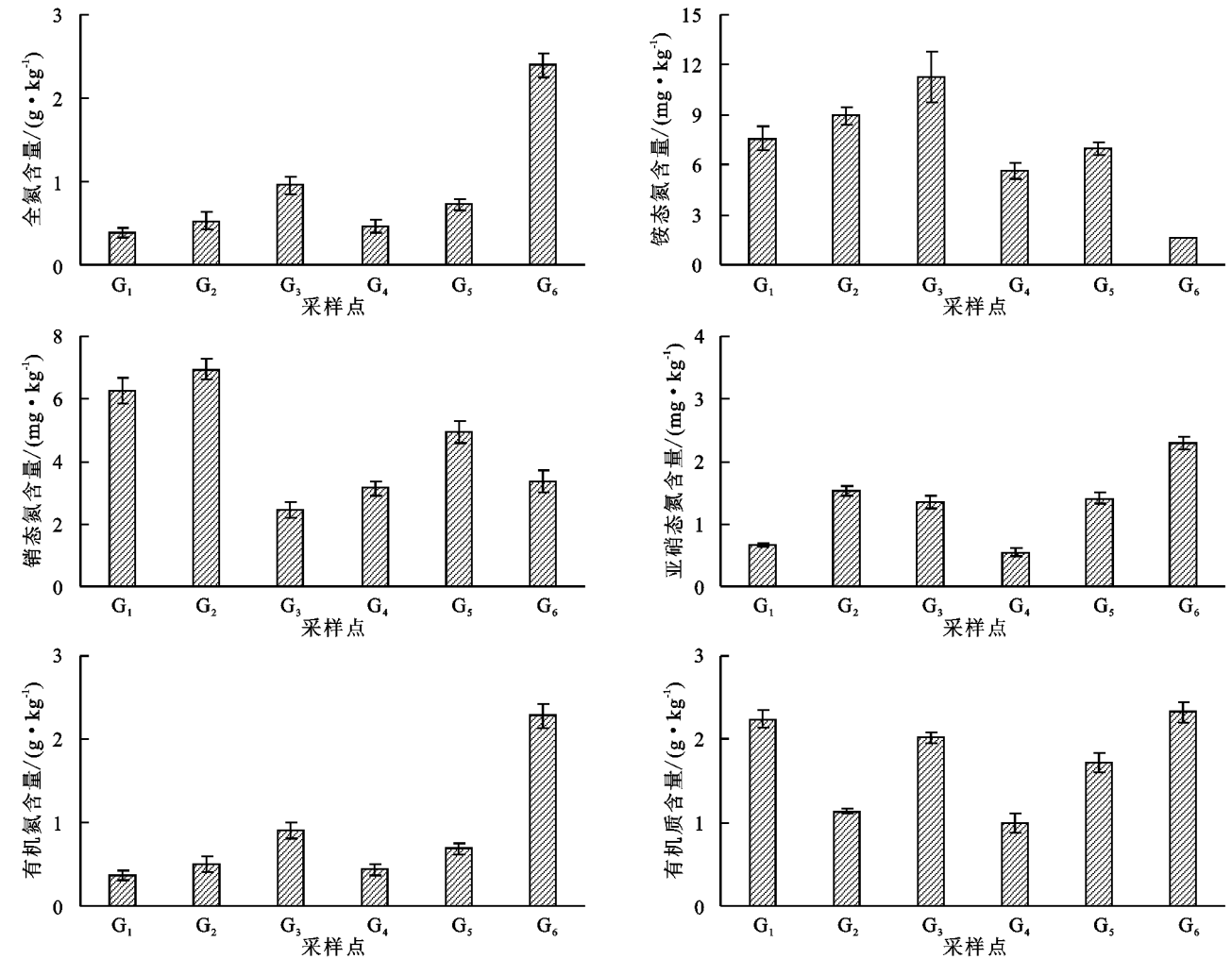


图 2 河岸表层沉积物氮素及有机质含量的分布特征

2.2 古运河沉积物有机质含量的变化特征

古运河沉积物有机质含量介于 0.99%~2.32%,平均值为 1.74%(表 1),变异系数为 32.50%,表现为中等变异性,表明各采样点的沉积物有机质含量变化幅度中等,其在空间上的分布规律为: $G_6>G_1>G_3>G_5>G_2>$

G_4 (图 2)。此外,沉积物 C/N 一般可反映出营养源的来源,本文中对沉积物 C/N 的计算结果表明,古运河河岸沉积物 C/N 在各采样点波动变化,平均值为 15.07,介于 5.62~33.79,变异系数为 63.81%,空间上表现为: $G_1>G_5>G_4>G_2>G_3>G_6$ 。

表 2 古运河河岸沉积物各形态氮所占比例

%

样品	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{TN}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{TN}$	$\text{NO}_2^--\text{N}/\text{TN}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{无机氮}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{无机氮}$	$\text{NO}_2^--\text{N}/\text{无机氮}$
G ₁	1.97	1.63	0.17	39.35	32.61	3.44
G ₂	1.69	1.32	0.29	33.87	26.34	5.83
G ₃	1.19	0.26	0.14	23.77	5.18	2.84
G ₄	1.21	0.68	0.12	24.30	13.58	2.33
G ₅	0.97	0.68	0.20	19.31	13.65	3.91
G ₆	0.07	0.14	0.10	1.36	2.80	1.91
平均值	1.18	0.78	0.17	23.66	15.69	3.37
最小值	0.07	0.14	0.10	1.36	2.80	1.91
最大值	1.97	1.63	0.29	39.35	32.61	5.83
方差	0.66	0.59	0.07	13.17	11.70	1.40
变异系数	55.66	74.58	41.59	55.66	74.58	41.59

2.3 沉积物中氮及其有机质与理化因子间的相关性分析

为进一步探讨古运河河岸沉积物中不同形态氮分布特征的因素,对各形态氮之间以及各形态氮雨沉积物 pH 值、有机质之间做相关性分析(表 3)。由表 3 可知,3 种形态的无机氮与 TN 相关系数由大到小分别为:亚硝态氮>氨氮>硝氮,可见亚硝氮与 TN 的关系最为密切。此外,亚硝态氮与有机氮之间存在显著正相关性($p<0.05$),表明二者之间可能存在着

生物地球化学的相互转化。而氨氮与硝氮、亚硝氮以及有机氮之间的相关性不强,说明氨氮与其他形态氮在沉积物方式上存在一定的差异性。

沉积物氨氮与 pH 值呈显著正相关关系、而亚硝态氮、有机氮以及总氮则与 pH 值呈显著负相关关系。($p<0.05$),表明 pH 值是影响沉积物氮形态的关键因素。而古运河沉积物氮形态与 OM 值之间无显著相关性,表明沉积物有机质对氮形态无明显的影响。

表 3 古运河河岸沉积物氮、有机质理化因子间的相关性系数

项目	氨氮	硝氮	亚硝氮	有机氮	pH 值	OM	C/N
氨氮	1.00						
硝氮	0.17	1.00					
亚硝氮	-0.38	-0.12	1.00				
有机氮	-0.66	-0.45	0.84*	1.00			
pH 值	0.77*	0.51	-0.77*	-0.96**	1.00		
O. M	-0.19	-0.16	0.39	0.55	-0.43	1.00	
C/N	0.31	0.53	-0.66	-0.59	0.66	0.24	1.00

注: ** 在 $p<0.01$ 水平(两侧)上显著相关; * 在 $p<0.05$ 水平(两侧)上显著相关。

3 讨论

3.1 古运河沉积物氮含量变化特征分析

大量研究表明,沉积物氮包括有机氮和无机氮。其中,沉积物有机氮主要包括蛋白质、核酸、氨基酸和腐殖质等,是沉积物氮的主要组成部分,而且是不容忽视的潜在生物有效氮源,对湖泊富营养化具有重要作用^[18],其来源主要包括两方面,一方面为水体中浮游植物残体碎屑、水生动物代谢产物、水生高等植物残体等分解产物所构成的内源污染物,另一方面为通过陆源性排放物质组成的有机氮的外源输入^[18]。一般来说,Org-N 在沉积物中的含量受多种因素控制的,如温度、pH 值、有机质含量等。而沉积物有机氮可以在微生物作用下转化成 NH_4^+-N 以及 NO_3^--N 等生物可利用的无机态氮,此外,受底栖生物扰动和微生物的分解作用等,Org-N 极

有可能从沉积物中扩散进入到上覆水体中,该过程将增加水体氮含量,成为水生生态系统氮素生物地球化学循环的重要环节^[19-21],因此,沉积物有机氮是反映水生生态系统初级生产力的重要指标^[22]。本文研究中发现,古运河河岸表层沉积物 Org-N 含量在各样点的变化顺序为:G₆>G₃>G₅>G₂>G₄>G₁>。其中,G₆ 点位于古运河支流玉带河,该河受沿岸居民的扰动较大,有部分生活污水、地表径流以及生活垃圾等未经处理直接排入玉带河,导致该河常年呈黑臭状态,大量的有机污染物排入玉带河后,从而导致该点位有机氮含量达到峰值,而 G₁ 样点位于古运河上游,该区域的污水管网较为完善,生活污水的排入较少,故该区域有机氮含量最低。

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 以及 NO_2^--N 是沉积物无机态氮的主要形态,三者同时属于可交换态氮,可以直接被生物利用,是水生生态系统初级生产力的关键指

标,由于可交换态氮可以在沉积物与上覆水体之间进行氮素的交换^[23-24],在适宜条件下, NH_4^+-N , NO_3^--N 以及 NO_2^--N 可从沉积物中释放出来,其迁移转化被认为是沉积物向上覆水体释放氮的主要机制之一^[18],其含量的高低将直接影响到上覆水体氮的污染状态,对水生态系统具有重要的生态意义,因此 NH_4^+-N , NO_3^--N 以及 NO_2^--N 含量往往被作为判断沉积物中氮污染程度的主要指标之一。本研究中,氨氮在各采样点则表现为 $G_3>G_2>G_1>G_5>G_4>G_6$ 的变化顺序,尽管 G_6 点总氮含量最高,但含氮物质在该河段的大量富集导致采样区域溶解氧含量极低,硝化反应受阻,从而导致水体氨氮含量最低。另外,对各形态氮所占比例进行计算后发现,各形态氮占总氮的比例顺序为: $\text{Org-N}>\text{NH}_4^+-\text{N}>\text{NO}_3^--\text{N}>\text{NO}_2^--\text{N}$,表明有机氮为古运河沉积物氮的主要赋存形态,而无机氮在古运河沉积物氮中所占比例较少,仅占总氮的0.01%~0.21%。而 NH_4^+-N , NO_3^--N 以及 NO_2^--N 占总氮的比例为0.07%~1.97%,0.14%~1.63%,0.10%~0.29%,平均值分别为1.18%,0.78%,0.17%。此外,以上3个形态氮分别占无机氮的1.36%~39.35%,2.80%~32.61%,1.91%~5.83%,平均值分别为23.66%,15.69%,3.37%,表明 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在古运河沉积物无机态氮中所占比例相当。各形态氮所占比例在各采样点有明显差异,可能与各样点水体理化因子、沉积物的粒度、pH值、氧化还原电位、生物扰动以及水动力条件的差异以及外源污染等密切相关。

与国内外其他河流或湖泊沉积物相比,古运河河岸沉积物总氮含量与南通市区各河流(1 320.33~2 131.67 mg/kg)^[23],古夫河(0.255~1.703 mg/g,平均值0.927 mg/g)^[5],洱海湖滨带(418.0~5 243 mg/kg,平均值1 832 mg/kg)^[25]以及望虞河(347.85~2 733.56 mg/kg)^[26]相当,高于洱海17条临湖段河流(23.10~310.60 mg/kg)^[27],但低于红枫湖流域消落带沉积物(1 626.95~2 926.13 mg/kg)^[28],长荡湖(3.47~10.80 g/kg)^[29]以及清溪河(2 140~9 470 mg/kg)^[30]。

3.2 古运河沉积物有机质含量变化特征的分析

沉积物有机质主要来自于水体中自养生物的合成和陆源输入,反映了水体受有机物污染的程度,是指示水体污染源污染程度的一个重要指标^[26,31]。沉积物中有机质含量会影响氮、磷、重金属等污染物的吸附和释放过程,对河流上覆水水质有非常重要的影响。研究表明,较高的有机质含量将造成沉积物中污染物的富集,此外,丰富的有机物将有利于微生物的生长繁殖,从而促使污染物的释放速度的加快^[23,32]。

古运河沉积物有机质含量介于0.99%~2.32%,平均值分别为1.74%(表1),变异系数为32.50%,表现为中等变异性,表明各采样点的沉积物有机质含量变化幅度中等,其顺序为 $G_6>G_1>G_3>G_5>G_2>G_4$,表明 G_6 点有机质含量最高,这与该点所处的环境及其外源污染与密切的关系。

对沉积物C/N的计算结果表明,古运河河岸沉积物C/N在各采样点波动变化,平均值为15.07,介于5.62~33.79,变异系数为63.81%。研究表明,由于蛋白质是生物体中最重要的含氮成分,不同类型有机质所含蛋白质不同^[33],如对于淡水生态系统而言,由于水生态系统生物种类的差异,其中藻类富含蛋白质而缺乏纤维素,而维管类高等植物体内纤维素含量高,蛋白质含量较低^[16,22],由此导致沉积物C/N比的显著差异,因此,利用C/N比可区分不同类型的有机质,并依此判断有机质的来源^[16,22,34-37]。如刘东艳等^[38]认为海源有机物C/N约为7,而陆源有机物C/N一般大于20。Prah等^[39]认为沉积物C/N比大于12时代表陆源有机质,小于8则代表湖泊自身有机质。而也有学者认为当C/N>10时,沉积物有机质以外源为主,C/N<10时,则以内源有机质为主,而C/N≈10时,表明外源与内源有机质基本达到平衡状态^[16,40-44]。根据以上判断标准可知,古运河河岸沉积物C/N平均值大于15,表明其以陆源贡献为主。

4 结论

(1) 古运河河岸表层沉积物氮及有机质含量具有一定的空间差异性,总氮和有机氮的离散程度较高,表明TN,Org-N在各采样点的含量差异较大,而沉积物氨态氮、硝态氮以及亚硝态氮表现为中等离散程度,表明以上元素在各采样点的变化不大。

(2) 有机氮为古运河沉积物氮的主要赋存形态,而无机氮在古运河沉积物氮中所占比例较少; NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在古运河沉积物无机态氮中所占比例相当。

(3) 古运河沉积物有机质含量在空间上的分布规律为 $G_6>G_1>G_3>G_5>G_2>G_4$,且以陆源贡献为主。

(4) 古运河河岸表层沉积物中亚硝氮与TN的关系最为密切,而氨氮与硝氮、亚硝氮以及有机氮之间的相关性不强,说明氨氮与其他形态氮在沉积物方式上存在一定的差异性。此外,pH值是影响古运河沉积物氮形态的关键因素。

参考文献:

- [1] Seitzinger S P, Sanders R W, Styles R. Bioavailability of DON from natural and anthropogenic sources to estuarine plankton [J]. Limnology and Oceanography,

- 2002,47(2):353-366.
- [2] 吕晓霞,宋金明,袁华茂,等.南黄海表层沉积物中氮的潜在生态学功能[J].生态学报,2004,24(8):1635-1642.
 - [3] Nowlin W H, Evarts J L, Vanni M J. Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir[J]. *Freshwater Biology*, 2005,50(2):301-322.
 - [4] 高丽,杨浩,周建民,等.滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J].环境科学学报,2004,24(5):776-781.
 - [5] 曾露,葛继稳,王自业,等.古夫河上覆水和表层沉积物中总氮和总磷空间分布特征及其相关性[J].安全与环境工程,2014,21(4):38-43.
 - [6] Kemp W M, Sampou P, Caffrey J, et al. Ammonium recycling versus denitrification in Chesapeake Bay sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990,35(7):1545-1563.
 - [7] 陈超,钟继承,范成新,等.湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究[J].环境科学,2013,34(10):3872-3878.
 - [8] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen J P, et al. Lake responses to reduced nutrient loading: an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies [J]. *Freshwater Biology*, 2005,50(10):1747-1771.
 - [9] 逢勇,颜润润,余钟波,等.风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究[J].环境科学,2008,29(9):2456-2464.
 - [10] 潘延安,雷沛,张洪,等.重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J].环境科学,2014,35(5):1727-1734.
 - [11] 岳维忠,黄小平.珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J].环境科学,2005,26(2):195-199.
 - [12] 蒋小欣,阮晓红,邢雅囡,等.城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及DO水平对底泥氮释放的影响[J].环境科学,2007,28(1):87-91.
 - [13] 朱元容,张润宇,吴丰昌.滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J].中国环境科学,2011,31(6):978-983.
 - [14] Zhu G W, Qin B Q, Zhang L. Phosphorus forms and bioavailability of lake sediments in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Science in China Series D*, 2009,49(1):28-37.
 - [15] 储金宇,张金萍,周晓红,等.镇江市古运河河岸沉积物重金属分布特征及潜在生态风险评价[J].环境化学,2015,34(4):763-771.
 - [16] 周晓红,李义敏,周艺,等.镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价[J].环境科学,2014,35(6):2148-2152.
 - [17] 黄玉洁,张勇,张银龙,等.太湖百渚港湿地植物群落沉积物中碳、氮的空间变化研究[J].环境科学与管理,2015,40(3):140-145.
 - [18] 李辉,潘学军,史丽琼,等.湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J].环境化学,2011,30(1):281-291.
 - [19] 卢少勇,远野,金相灿,等.7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J].环境科学,2012,33(5):1497-1502.
 - [20] 吴丰昌,金相灿,张润宇,等.论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J].湖泊科学,2010,22(1):1-7.
 - [21] 马久远,王国祥,李振国,等.太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征[J].环境科学,2014,35(2):577-584.
 - [22] 于宇,宋金明,李学刚,等.沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J].生态学报,2012,32(5):1623-1632.
 - [23] 赵力,蒋慧,董艳,等.南通市河床底泥营养物质污染特征及环境风险分析[J].中国环境监测,2014,30(4):16-20.
 - [24] 王雨春,万国江,尹澄清,等.红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定态氮的赋存特征[J].环境科学,2002,14(4):301-309.
 - [25] 尹延震,王苗,郑钊.洱海湖滨带底泥全氮、全磷及有机质空间分布特征研究[J].环境科学与管理,2014,39(7):40-44.
 - [26] 任凌霄,王沛芳,王超,等.望虞河表层沉积物中氮的分布与形态变化特征[J].环境工程学报,2015,9(3):1201-1209.
 - [27] 张闻涛,邢奕,卢少勇,等.入洱海河流临湖段底泥氮的分布[J].环境科学研究,2015,28(2):213-218.
 - [28] 邓河霞,夏品华,陈文生,等.红枫湖流域消落带及其沉积物营养盐含量的分布特征[J].武汉工程大学学报,2014,36(12):27-33.
 - [29] 朱林,汪院生,邓建才,等.长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J].水资源保护,2015,31(6):135-140.
 - [30] 王梅,刘琰,郑丙辉,等.城市内河表层沉积物氮形态及影响因素:以许昌清潩河为例[J].中国环境科学,2014,34(3):720-726.
 - [31] 奚旦立,孙裕生,刘秀英.环境监测[M].3版.北京:高等教育出版社,2004.
 - [32] 范成新,杨龙元,张路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J].湖泊科学,2000,12(4):359-367.
 - [33] 葛晨东,王颖, Pedersen T F,等.海南岛万泉河口沉积物有机碳、氮同位素的特征及其环境意义[J].第四纪研究,2007,27(5):845-850.
 - [34] 刘霞.长江口及其邻近海域沉积物有机污染物的分布特征及对有机质来源的指示意义[D].山东青岛:中国海洋大学,2012.
 - [35] 张生银,李双林,董贺平,等.南黄海北部表层沉积物中生物标志的组成特征及其地球化学意义[J].海洋通报,2012,31(2):198-206.
 - [36] 罗昭林,朱长波,郭永坚,等.流沙湾表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征和污染评价[J].南方水产科学,2014,10(3):1-8.

(2) 气象因素对退耕还林(草)有一定的影响,但影响作用并不显著。年平均相对湿度与退耕还林(草)的分布呈倒 U 形关系。年平均降雨量对退耕还林(草)区的林草生长有一定的影响,但影响作用较小。

(3) 社会经济因素对退耕还林(草)有着显著的影响作用。人均耕地面积和退耕还林(草)的面积有着正相关关系,人均耕地面积越多,退耕还林(草)面积也相对较多,这与基本口粮田项目建设的政策相吻合。

由以上分析可知,地形因素决定退耕还林(草)区位的选择和退耕质量以及后期管护的难易程度,气象因素影响退耕林草的长势和成活率,社会经济因素决定该地区是否有耕地资源实施退耕还林(草)。吴起县作为全国退耕还林第一县,在实施退耕还林(草)过程中,严格遵守国家政策,在坡度高、高程高、距离公路较远的耕地进行退耕,对其他地区退耕还林(草)工程的实施起到了示范效应。退耕还林(草)是一项综合性很强的工程,在新一轮退耕还林(草)过程中,政府在制定政策时应考虑地形因素、社会经济因素及当地气候条件的影响作用,使决策执行结果更具科学性,更加符合客观实际情况,提高退耕还林(草)工程的质量。

参考文献:

- [1] 刘宗飞,姚顺波,渠美. 吴起农户相对贫困的动态演化: 1998—2011[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 56-62.
- [2] 国家林业局. 中国林业统计年鉴[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [3] 蒋海. 中国退耕还林的微观投资激励与政策的持续性[J]. 中国农村经济, 2003(8): 30-36.
- [4] 刘璨,武斌,鹿永华. 中国退耕还林工程及其所产生的影

响[J]. 林业经济, 2009(10): 41-46.

- [5] 谷振宾,王立群. 我国退耕还林生态影响及其评估研究进展[J]. 生态经济, 2007(5): 27-29.
- [6] 孔凡斌. 生态补偿机制国际研究进展及中国政策选择[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2010, 10(2): 1-5.
- [7] Arekhi M S. Modeling spatial pattern of deforestation using GIS and logistic regression: A case study of northern Ilam forests, Ilam province, Iran[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(72): 16236-16249.
- [8] 顾哲衍,张金池,汪春林,等. 退耕还林对皖西金寨县森林景观格局演变的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 149-153.
- [9] Schmitt-Harsh M. Landscape change in Guatemala: Driving forces of forest and coffee agro-forest expansion and contraction from 1990 to 2010 [J]. Applied Geography, 2013, 40(2): 40-50.
- [10] 崔步礼,李小雁,姜广辉,等. 基于 DEM 的山地丘陵区土地利用/覆被研究: 以青海湖流域为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 871-880.
- [11] 张道军,成秋明,左仁广. 证据权模型中两种预测单元划分方式对比[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(3): 1040-1052.
- [12] 周文渊,郭建英,孙保平,等. 吴起县退耕还林工程实施前后土地利用/覆盖变化[J]. 中国水土保持, 2010(7): 45-48.
- [13] 王思远,黄裕婕,陈志祥. 黄河流域退耕还林还草的遥感研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(3): 306-309.
- [14] 许辉熙,薛万蓉. 考虑坡度因子与时序问题的小流域退耕还林时空决策分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2015(4): 30-32.
- [15] 刘燕强. 大气相对湿度变化趋势对农作物的影响研究[J]. 中国农业信息, 2013(7): 190-190.

(上接第 318 页)

- [37] 甘树,卢少勇,秦普丰,等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3064-3070.
- [38] 刘东艳,申旭红,王玉珏,等. 烟台四十里湾表层沉积物有机质来源及环境意义[J]. 海洋学报, 2012, 34(5): 205-212.
- [39] Prahl F G, Bennett J T, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(12): 1967-1976.
- [40] 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.

- [41] 刘恩峰,沈吉,朱育新,等. 太湖沉积物重金属及营养盐污染研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 507-512.
- [42] 张雷,郑丙辉,田自强,等. 西太湖典型河口区湖滨带表层沉积物营养评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(5): 4-9.
- [43] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India [J]. Nature, 1986, 323(11): 150-152.
- [44] 王苏民,冯敏. 内蒙古岱海湖泊环境变化与东南季风强弱的关系[J]. 中国科学 B 辑, 1991(7): 759-768.