

天津于桥水库流域河流表层沉积物中碳·氮·磷分布及污染评价

吕豪朋, 申丽娜 (天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要 对流域内 33 个河流表层沉积物样点的总有机碳(TOC)、总氮(TN)和磷形态含量进行了测定, 分析了沉积物中碳、氮、磷含量的分布特征及三者之间的相关性, 并对于桥水库流域河流表层沉积物进行污染现状评价。结果表明: 于桥水库流域河流表层沉积物 TOC 平均含量为 0.99%, TN 平均含量为 0.15%, TP 平均含量为 1 904.93 mg/kg。相关性分析表明, 沉积物 TOC 与 TN 呈极显著正相关($R^2 = 0.794$), TOC 与草地面积比例呈极显著正相关, R^2 为 0.685; TN 和草地面积比例呈显著正相关($R^2 = 0.392$); TP 与各种土地利用类型的相关性均不明显, 但 OP 和 Fe/Al-P 与城镇居民用地面积比例呈极显著正相关, R^2 分别为 0.664 和 0.698, 与林地面积比例呈显著负相关, R^2 分别为 -0.472 和 -0.403。有机指数和有机氮评价结果显示, 有 48.5% 的采样点有机指数处于 I 类水平, 有 39.4% 和 48.5% 样点有机氮处于 III 和 IV 类污染水平, 表明于桥水库流域河流表层沉积物有机指数整体处于尚清洁及以上水平, 受到有机污染程度较小, 而流域内的有机氮污染相对较为严重。

关键词 于桥水库流域; 沉积物; 有机碳; 氮; 磷; 污染状况
中图分类号 X82 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)27-0098-05

Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorous of River Surface and Pollution Status Evaluation of Sediments in Yuqiao Reservoir Basin, Tianjin

LÜ Hao-peng, SHEN Li-na (College of Urban and Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

Abstract The contents of total organic carbon, total nitrogen and phosphorus in the sediment samples of 33 rivers in the watershed were measured, the distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in sediment and the correlation between the three were analyzed, and the pollution status of river surface sediments in Yuqiao Reservoir Basin was evaluated. The results showed that the average content of TOC in the surface sediments of the Yuqiao Reservoir Basin was 0.99%, the average content of TN was 0.15%, and the average content of TP was 1 904.93 mg/kg. Correlation analysis showed that the sediments of TOC and TN was significantly positive correlation ($R^2 = 0.794$), TOC and the proportion of grassland area was significantly positively correlated, R^2 was 0.685; there was a positive correlation between TN and grassland area ratio ($R^2 = 0.392$). TP and various types of land use have no correlation, but OP and Fe/Al-P and the urban area proportion was significantly positively correlated, R^2 were 0.664 and 0.698 respectively, and the forest area ratio had a significant negative correlation, R^2 of -0.472 and -0.403 respectively. The organic index and organic nitrogen evaluation results showed that organic index of 48.5% sampling points was in the I class level, there were 39.4% and 48.5% samples of organic nitrogen in III and IV. The result showed that pollution level of Yuqiao reservoir sediment basin river surface organic index as a whole was still clean and above the level of the organic pollution was less, and organic nitrogen pollution the basin was relatively serious.

Key words Yuqiao Reservoir Watershed; Sediment; Organic carbon; Nitrogen; Phosphorus; Pollution status

氮、磷作为导致水体水质恶化的主要因素之一, 一直以来备受人们关注。一方面, 氮、磷是生态系统中必不可少的营养元素^[1], 另一方面, 氮、磷的过剩又会导致水域的富营养化, 使水环境质量下降, 水体生态平衡遭到破坏^[2]。沉积物是河流环境变化的重要指示器之一, 沉积物不仅对上覆水体中的磷浓度具有缓冲作用, 而且也是河流水体中磷的重要来源^[3], 会在一定程度上促进水体的富营养化, 对河流生态环境产生威胁^[4]。磷与不同元素吸附在一起会形成各种不同形态的磷, 反映着河流不同程度的污染状况^[5]。沉积物作为碳、氮、磷等营养物质的主要储存库, 在河流生态系统氮、磷循环中起着重要作用。河流水体是向水库、湖泊运输氮、磷等生物营养元素的重要载体, 河流表层沉积物中氮、磷的迁移和转换会直接影响河流中氮、磷的生物可利用性^[6], 从而对河流水环境质量产生影响。研究流域内河流沉积物中碳、氮、磷含量的空间分布特征, 了解流域污染物现状水平, 可为改善流域环境质量提供科学指导。

于桥水库是引滦入津工程重要的调蓄水库, 是天津地区主要水源之一, 也是天津市人民生活饮用水和工农业生产用水的重要水源地^[7]。近年来, 由于流域内人们生活水

平的显著提高, 生产生活垃圾也随之增加, 导致入库污染物质急剧增加, 水库水环境质量日趋下降, 其水环境安全问题受到高度关注。李玉英等^[8]通过对于桥水库水质现状的评价及 10 多年来水体中营养盐浓度和富营养化响应特征的对比, 得出于桥水库水质处于富营养化向重度营养化过渡、接近重度营养化边缘的结论, 并指出于桥水库底质中的营养盐是引起富营养化的原因之一。然而, 目前对于桥水库流域河流表层沉积物中碳、氮、磷分布特征的研究却鲜见报道。因此, 笔者着重对于桥水库流域表层沉积物中总有机碳、总氮及各形态磷含量分布特征进行研究, 并结合流域土地利用分析碳、氮、磷与土地利用方式的相关性, 并评价其污染现状, 旨在为了解流域污染物现状及改善流域环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 于桥水库位于天津市北部, 117°34' ~ 117°39' E, 40°09' ~ 40°14' N, 是京津冀地区重要的大型水库, 流域总面积 2 060 km²。流域北邻河北省兴隆县, 西接天津蓟州区, 东南毗邻河北省遵化市、迁西县。流域主要位于河北省遵化市(图 1)。流域地形东北高, 西南低, 西部以山区为主, 中部多为平原, 南部多低山和丘陵。流域属温带大陆性季风气候, 夏季降雨较为集中, 年平均降雨量约 700 mm。

1.2 样品采集 基于 1:5 万 DEM 地形图, 借助 ArcGIS 10.2

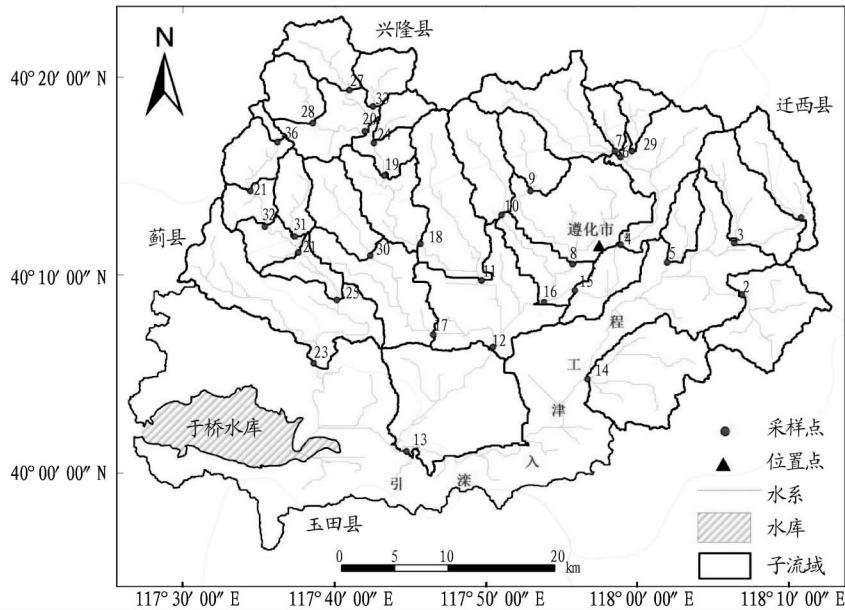


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

软件,将于桥水库上游流域划分为 33 个子流域,同时考虑不受引滦入津工程的影响^[9]。在每个子流域河流出水口各设置 1 个采样点(图 1),各采集点分别对应 1 个集水区。于 2016 年 6—11 月共进行 5 次采样,每次样品采集后放入聚乙烯密封袋中,并置于放有冰袋的保温箱内保存。带回实验室后将样品进行真空冷冻干燥,干燥后用研钵进行研磨,除去肉眼可见杂质,过 100 目筛,取适量处理后的样品加入稀盐酸,除去其中的有机质后用超纯水洗涤至中性,测定沉积物中的总有机碳(TOC)和总氮(TN),剩余样品干燥避光低温密封,保存于封口袋,待用。

1.3 测定项目与方法 采用元素分析仪(PerkinElmer 2400)测定沉积物 TOC 和 TN。沉积物磷的形态测定采用欧洲标准测试测量法 SMT^[10-11],将沉积物中的磷分为总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、NaOH-P(Fe/Al 结合态磷)和 HCl-P(Ca 结合态磷)5 类。各步提取以后离心,然后将上清液稀释合适的倍数后,用钼酸铵分光光度法测定磷含量(GB—11893—89),残渣进入下一步继续提取。

1.4 污染状况评价方法与标准的选择和确定 目前对水体沉积物环境质量评价方法缺乏统一的标准,选用当前应用较多的有机指数法,对于桥水库流域表层沉积物中碳、氮的营养状况进行评价,同时运用污染指数法评价于桥水库流域磷的污染状况^[12]。有机指数常用来评价水域沉积物的环境状况,有机氮是判别沉积物受氮污染程度的重要指标^[13],二者的评价标准见表 1、2。有机指数、有机碳、有机氮的计算方法和评价标准如下:

有机指数 = TOC(%) × 有机氮(%)

有机碳(%) = 有机质/1.724

有机氮(%) = TN × 0.95

2 结果与分析

2.1 土地利用结构特征 2015 年于桥水库流域土地利用

表 1 沉积物有机指数评价标准

Table 1 Organic index evaluation standard of sediment

等级 Grade	有机指数 Organic index	类型 Type
I	< 0.05	清洁
II	0.05 ~ <0.20	较清洁
III	0.20 ~ <0.50	尚清洁
IV	≥0.50	有机污染

表 2 沉积物有机氮评价标准

Table 2 Organic nitrogen assessment criteria of sediment

等级 Grade	有机氮 Organic nitrogen content//%	类型 Type
I	<0.033	清洁
II	0.033 ~ <0.066	较清洁
III	0.066 ~ <0.133	尚清洁
IV	≥0.133	有机氮污染

类型分布见图 2。由图 2 可知,研究区子流域土地利用方式以园地和林地为主,平均面积百分比分别为 31.48% 和 29.84%。城镇居民用地面积也较大,占子流域的比重为 2.01% ~ 67.87%,平均为 19.06%;耕地面积比重在 0.90% ~ 56.27%,平均为 12.56%;草地面积比例为 1.13% ~ 31.91%,平均为 6.69%;裸地平均为 0.38%。综合来看,于桥水库流域土地利用情况差异较大,空间分布特征复杂。林地和园地在流域上游分布较多,从流域上游到下游,林地、耕地面积比例表现出下降趋势,城镇居民用地面积在 4、5、8、12、15、16 这 6 个子流域所占比重相对较高,均大于 30%,其他各子流域变化较为平稳,表明城镇居民用地主要分布在流域中下游。

2.2 河流表层沉积物中 TOC 含量及分布特征 于桥水库流域河流表层沉积物中总有机碳(TOC)含量在 0.04% ~ 5.29%(图 3),平均为 0.99%,最高值位于流域下游的 1 号样点,为 5.29%,最低值在流域上游 31 号点,为 0.04%,两者相

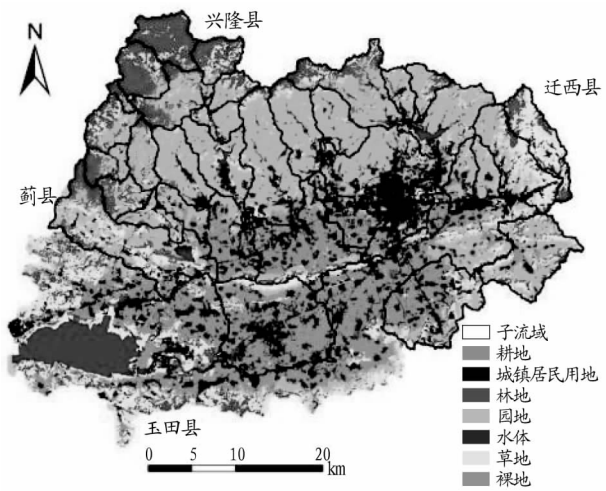


图2 2015年研究区土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of land use types of the study area in 2015

差约 132 倍。其中,1、3、16、24、28 采样点的 TOC 含量均在 2.00% 以上,其余样点均不足 2.00%。总体来看,表层沉积物中 TOC 含量差异较大,但在流域上下游之间未表现出明显的规律性。

2.3 河流表层沉积物中 TN 含量及分布特征 由图 4 可知, TN 含量在 0.04% ~ 0.38%, 相比于沉积物中 TOC 含量, TN 含量差异相对较小,且最高值和最低值均出现在流域上游, 分别为 28 和 32 号点, 两者含量相差 9.5 倍。除了 1、3、16、19、24、28 采样点较大(均超过 0.28%)外,其余样点 TN 含量变化较为平稳,表明流域内河流表层沉积物中 TN 含量差异较小,总体变化幅度不大。

2.4 河流表层沉积物中磷含量及分布特征

2.4.1 TP 含量及分布特征。由图 5 可知,于桥水库流域河流表层沉积物中 TP 含量为 425.94 ~ 3 412.96 mg/kg,平均为 1 904.93 mg/kg,其中 2、7、30 号样点 TP 含量相对较高,均超

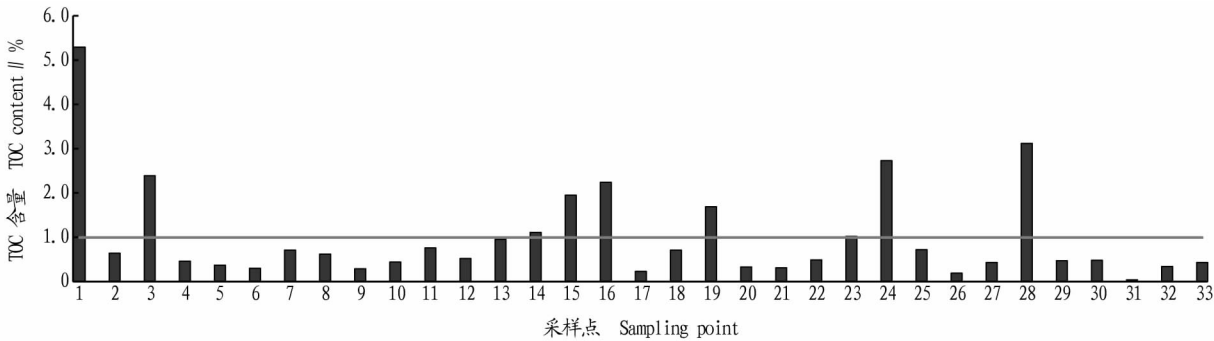


图3 各采样点沉积物中总有机碳(TOC)含量分布

Fig. 3 Distribution of total organic carbon(TOC)content in sediment samples

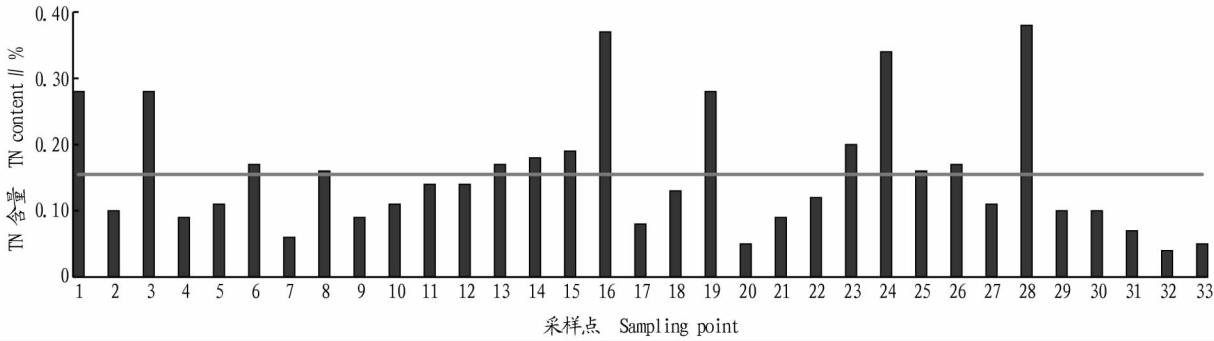


图4 各采样点沉积物中总氮(TN)含量分布

Fig. 4 Distribution of total nitrogen(TN)content in sediment samples

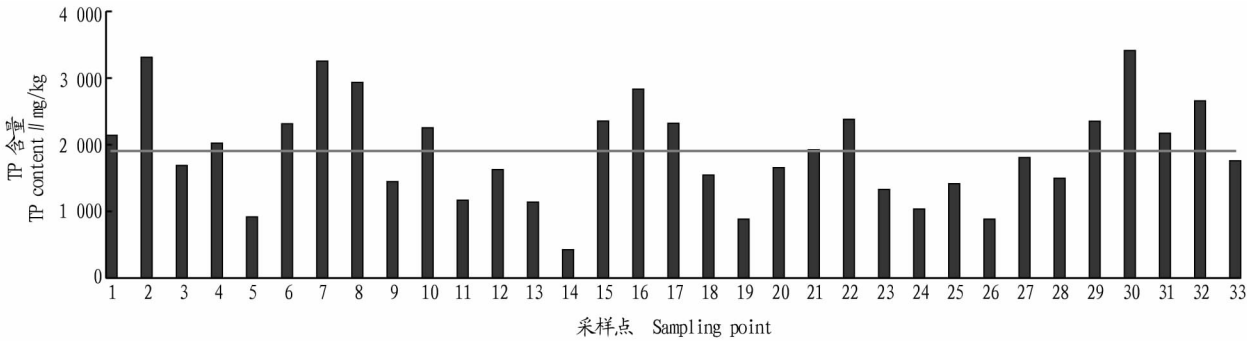


图5 各采样点沉积物中总磷(TP)含量分布

Fig. 5 Distribution of TP content in sediment samples

过 3 000 mg/kg,与国内部分典型河流水体(海河流域 100 ~ 1 142 mg/kg^[14],密云水库 760 ~ 910 mg/kg^[1],太湖流域 128 ~ 2 655 mg/kg^[15])相比,该流域沉积物 TP 含量处于较高水平。根据加拿大《沉积物质量指南》,当沉积物浓度超过 2 000 mg/kg 时,底栖生物将遭到明显破坏^[16-17],于桥水库流域河流表层沉积物平均 TP 含量超过 1 900 mg/kg,且有 45% 样点的 TP 含量大于该值,表明该流域表层沉积物污染状况较为严重。根据现场观察发现,TP 含量较高的 2、7 和 30 号样点均位于村镇内,且 30 号采样点处定期会有集市,人员流动较大,垃圾堆放严重,这可能是导致 TP 含量较高的原因。

2.4.2 铁铝磷(Fe/Al-P)含量及分布特征。Fe/Al-P 主

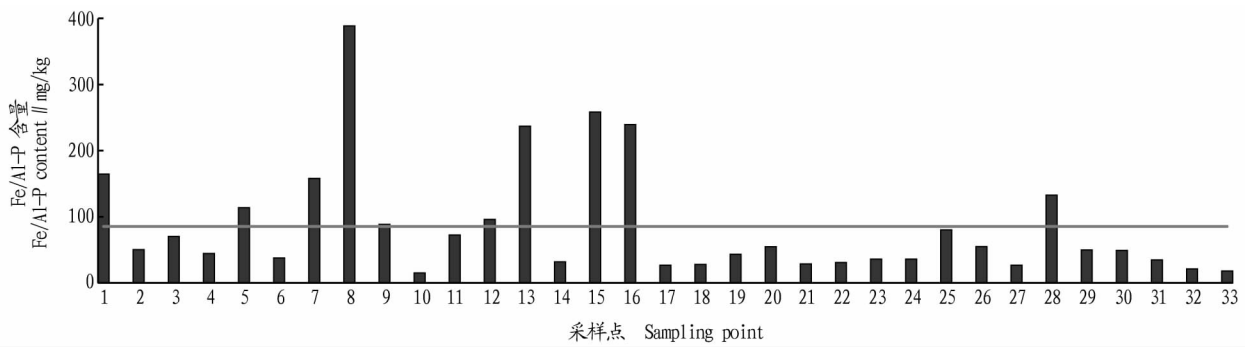


图 6 各采样点沉积物铁铝磷(Al/Fe-P)含量分布

Fig. 6 Distribution of Al/Fe-P content in sediment samples

2.4.3 OP 含量及分布特征。OP 主要是指各类有机物中所结合的磷形态,在各形态磷中,OP 被认为是可部分为生物利用的磷,主要与沉积物的细菌群落、藻类生物膜和大型植物相关^[20],主要来源于农业面源污染。由图 7 可知,于桥水库流域表层沉积物 OP 含量相对较低,其含量在 28.97 ~

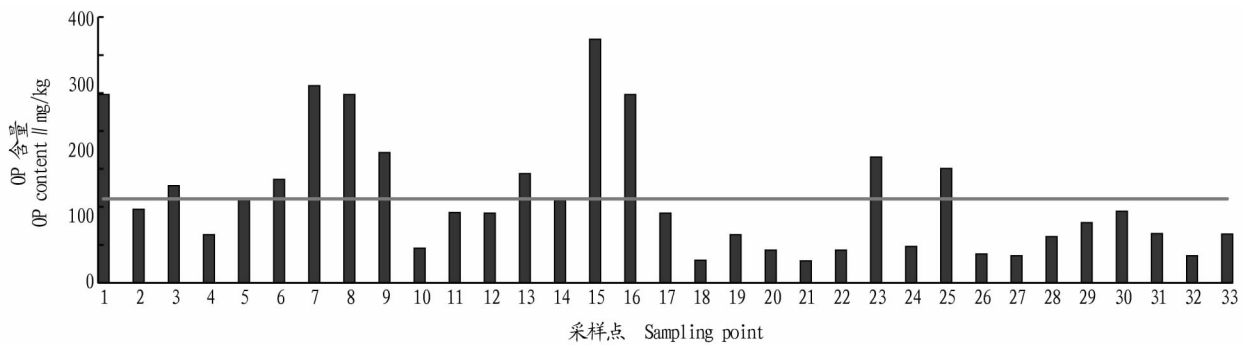


图 7 各采样点沉积物 OP 含量分布

Fig. 7 Distribution of OP content in sediment samples

2.5 河流表层沉积物碳、氮、磷相关性分析 为了解于桥水库流域表层沉积物中碳、氮、磷及其与流域土地利用之间的关系,对其进行了相关性分析,结果见表 3。由表 3 可知,沉积物 TOC 与 TN 极显著正相关,复相关系数(R^2)为 0.794,表明沉积物碳和氮具有同源性;而 TOC 与 TP 的相关性不明显,但与 OP、Fe/Al-P 均显著正相关,但 R^2 不大,分别为 0.391 和 0.322,出现这种差异的原因可能是 TOC 与 OP 和 Fe/Al-P 均具有相似的来源。此外,TOC 与草地面积比例极显著正相关, R^2 为 0.685;TN 含量和草地面积比例显著正

要是 Al、Mn、Fe 金属氧化物以及氢氧化物所吸附的磷,深受沉积物粒度及 pH、氧化还原电位等环境因子的影响^[18]。Fe/Al-P 被认为是沉积物中易变的磷,是沉积物中潜在的磷释放源之一,Fe/Al-P 往往被认为是可以被生物所利用的磷组分,与人类生产活动密切相关,主要来源于生活污水和工业废水^[19]。由图 6 可知,在所有采样点中,Fe/Al-P 含量为 14.96 ~ 388.68 mg/kg,平均为 85.37 mg/kg,占 TP 的 0.66% ~ 20.80%,平均为 4.96%;最高点位于 18 号样点,最低点出现在 10 号样点,两者差异达到近 26 倍,且所有形态磷中 Fe/Al-P 的变异系数最大,为 100.48%,表明于桥水库流域不同区域受到人类活动的影响程度呈现出较大的差异,反映了不同区域受磷污染状况不同。

320.96 mg/kg,平均含量为 110.63 mg/kg,平均占 TP 的 6.62%。OP 含量的变异系数也较大,为 71.920%,表明 OP 的空间分布差异也较大。整体来看,OP 在流域下游含量普遍较高,最高点也位于下游的 15 号点,最低点位于上游的 21 号点。

相关, $R^2=0.392$ 。TP 含量与各种土地利用类型的相关性均不明显,但 OP 含量和 Fe/Al-P 与城镇居民用地面积比例极显著正相关, R^2 分别为 0.664 和 0.698,与林地面积比例极显著负相关, R^2 分别 -0.472 和 -0.403。

以上结果表明,流域土地利用的方式会影响到河流沉积物碳、氮、磷的分布状况。城镇面积比例增加会造成 OP 和 Fe/Al-P 的含量增大,林地面积比例增大则会使 OP 和 Fe/Al-P 含量减小。这是由于城镇内人口密集,人类活动强度大,居民日常生活产生的各种污染物较多,并且随着城镇

面积的不断增大,其污染排放也成为流域磷素积累的重要来源,这也符合小城镇河流具有高度污染特点的研究结果^[21]。TOC 和 TN 含量随着草地面积比例的增加而增大,说明草地是 TOC 和 TN 的重要贡献源。同时,TOC 和 TN 与 Fe/Al - P

具有一定的正相关性,反映出三者来源具有相似性,而 Fe/Al - P 在很大程度上受人类活动和陆源输入的影响^[22],由此可推断,TOC 和 TN 的分布很可能也受到人为输入等外源负荷的作用。

表3 沉积物总有机碳、总氮和磷含量与流域土地利用面积比例的相关性
Table 3 Correlation of total organic carbon, total nitrogen and phosphorus and land use in Watershed

指标 Indexes	TOC	TN	TP	OP	Fe/Al - P	土地利用面积 Land use area					
						城镇居民用地 Urban residential land	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	园地 Garden plot	草地 Grassland	裸地 Bare land
TOC	1.000	0.794**	-0.093	0.391*	0.322*	0.150	0.004	-0.074	-0.243	0.685**	-0.206
TN		1.000	-0.268	0.269	0.325*	0.209	0.184	-0.185	-0.194	0.392*	-0.171
TP			1.000	0.310*	0.233	0.073	-0.194	0.008	0.146	-0.143	-0.040
OP				1.000	0.777**	0.664**	0.279	-0.472**	-0.146	0.135	-0.296*
Fe/Al - P					1.000	0.698**	0.379*	-0.403*	-0.277	-0.056	-0.245
城镇 Town						1.000	0.565**	-0.770**	-0.139	-0.186	-0.197
耕地 Cultivated land							1.000	-0.494**	-0.515**	-0.242	-0.160
林地 Woodland								1.000	-0.345*	0.114	-0.046
园地 Garden plot									1.000	-0.146	0.352*
草地 Grassland										1.000	-0.133
裸地 Bare land											1.000

注: ** 表示极显著相关($P < 0.01$); * 表示显著相关($P < 0.05$)
Note: ** indicated extremely significant correlation($P < 0.01$); * indicated significant correlation($P < 0.05$)

2.6 评价结果 于桥水库流域河流表层沉积物有机指数和有机氮波动幅度均较大,有机指数在 0.003 ~ 1.407,最大值与最小值相差 400 多倍;有机氮在 0.038 ~ 0.361,最大值与最小值相差 9.5 倍。由表 4 可知,有机指数中,48.5% 的采样点处于 I 类污染水平,表现为清洁状态。属于较清洁的 II 类污染水平和尚清洁的 III 类水平的采样点分别占总样点的 30.3% 和 6.0%,只有 15.2% 的样点属于 IV 类污染水平,即受到有机污染。表明于桥水库流域河流表层沉积物受到有机

污染水平相对较轻,大部分区域处于尚清洁及以上水平。有机氮处于 I 类污染水平的样点个数为 0,处于 II、III、IV 类污染水平的样点个数分别为 4、13、16 个,分别占总样点个数的 12.1%、39.4% 和 48.5%。表明于桥水库流域河流表层沉积物有机氮污染较为严重,流域内大部分样点已受到不同程度的有机氮污染或接近污染水平,这可能与于桥水库流域广泛种植的板栗有关,因板栗生长过程中需要施用大量氮肥,不可避免地对周围河流沉积物造成一定程度的污染。

表4 于桥水库流域河流表层沉积物污染评价
Table 4 Pollution assessment of river surface sediments in Yuqiao Reservoir Watershed

评价指数 Evaluation index	I		II		III		IV	
	站点数 Number of stations//个	百分比 Percentage %	站点数 Number of stations//个	百分比 Percentage %	站点数 Number of stations//个	百分比 Percentage %	站点数 Number of stations//个	百分比 Percentage %
有机指数 Organic index	16	48.5	10	30.3	2	6.0	5	15.2
有机氮 Organic nitrogen	0	0	4	12.1	13	39.4	16	48.5

3 结论

(1) 于桥水库流域河流表层沉积物中碳、氮、磷含量的空间分布差异都较大。其中,TOC 含量在 0.04% ~ 5.29%,平均为 0.99%;TN 含量 0.04% ~ 0.38%,平均为 0.15%;TP 含量在 425.94 ~ 3 412.96 mg/kg,平均为 1 904.93 mg/kg,且 TP 主要受到 IP 控制,Ca - P 是沉积物磷的最主要的存在形态。
(2) 沉积物 TOC 与 TN 极显著正相关, R^2 为 0.794,表明沉积物碳和氮具有同源性;TOC 与草地面积比例极显著正相关, R^2 为 0.685;TN 和草地面积比例显著正相关($R^2 = 0.392$),表明 TOC 和 TN 含量随着草地面积比例的增大而增大,说明草地是 TOC 和 TN 的重要贡献源之一。TP 与各种土地利用类型的相关性均不明显,但 OP 和 Fe/Al - P 与城镇

居民用地面积比例呈极显著正相关, R^2 分别为 0.664 和 0.698,与林地面积比例呈显著负相关, R^2 分别 -0.472 和 -0.403。同时,TOC 和 TN 与 Fe/Al - P 正相关性,反映出三者来源具有相似性。
(3) 有机指数和有机氮评价结果表明,于桥水库流域河流表层沉积物整体处于尚清洁及以上水平,受到有机污染较小,而流域内的有机氮污染相对较为严重,这与大量施用氮肥板栗林的广泛种植具有密切联系。
参考文献
[1] 刘浏,刘晓端,徐清,等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 岩矿测试,2003,22(2):81 - 85.
[2] 翁焕新,刘云峰. 滨海沉积物和间隙水中的磷研究:以美国墨西哥湾为例[J]. 环境科学学报,1997,17(2):148 - 153.
(下转第 167 页)

菌剂处理土壤作用下,根瘤会增大。

低剂量菌剂处理的土壤中苗木的发病原生位置平均值(89.4%)高于高剂量菌剂处理的土壤中苗木(57.1%)。患病位置分为原生和新生2种,原生比值越小,则表示该处理对植株伤口再患病的抑制性更强。高、低剂量菌剂处理土壤中,处理④的方法对原伤口再患病的抑制性最好。由此可以得出,使用液体菌剂浸泡+立即灌根+15 d 灌根的处理方式对患根瘤病的钙果苗木伤口抑制病发效果最佳。

3 讨论

感病苗木根瘤病的防治需在一定成活率的基础上才有实际意义。尽管高浓度菌剂处理土壤中的处理⑦、⑧的复发率为0,但成活率极低。该试验使用了多种化学药剂、生物菌剂进行处理,并在处理方式上形成多种处理。试验中运用了不同浓度的菌剂处理土壤,综合分析在低浓度菌剂处理过的土壤中,各个处理的成活率与复发率比高浓度菌剂处理过的土壤中表现更好。将盆栽试验中低剂量微生物菌剂处理的土壤中栽种的苗木表现较为良好的处理①、处理③、处理④、处理⑥和高剂量微生物菌剂处理的土壤中栽种的苗木表现比较好的处理③、处理④,几组数据的发病率与成活率的比值综合分析,得到低剂量微生物菌剂处理的土壤中处理④的比值最小,初步认为该处理最有效,即用低浓度菌剂处理土壤并用液体微生物菌剂浸泡根系和灌根处理结合的方法最有效。

而在新梢长度方面,高浓度的微生物菌剂处理过的土壤中的结果更好。因此,在钙果植株根瘤病的防治中,可以应用低浓度的微生物菌剂来处理土壤,达到防治效果。在无根瘤病隐患的情况下,可以使用高浓度微生物菌剂处理的土壤达到促进生长的效果。

对于钙果苗根瘤病的防治,最好的方法就是进行综合防

治。可从以下几个方面进行:①选用抗病的苗木或对已选用的苗木进行消毒处理,该试验中硫酸铜消毒后加菌剂处理有一定效果。②减少植株的各种伤口或促进伤口愈合,防止病菌侵入,该试验使用了愈合剂涂抹的方法,但对根瘤的防治没有效果。③钙果苗在栽培前,做好检疫。④加强田间管理,多施磷肥、钾肥和酸性肥料,适量使用生物菌剂,增强树势从而提高植株的抗性。对钙果苗的根瘤病防治,还需要做更多更全面的研究。

4 结论

化学药剂中石硫合剂会导致苗木全部死亡,其他2种影响较小,单独使用对根瘤的防治没有效果。菌剂中K84(1:1)涂抹显著提高了成活率,且根瘤复发率也显著低于对照;低浓度地里旺菌剂处理土壤并用液体菌剂或1.0%硫酸铜浸泡根系以及栽后菌剂灌根的处理苗木成活率较高且根瘤复发率较低。

参考文献

- [1] 张红. 大樱桃根瘤病及其防治[J]. 北方果树,2014(6):31-32.
- [2] 黄贞元,赵改荣,韩礼星,等. 甜樱桃根瘤病的危害与控制[J]. 果农之友,2004(4):3-6.
- [3] 刘焕英,段成国,陈学森,等. 核果类果树根瘤病菌寄主范围及抗性研究初报[J]. 北方果树,2002(5):4-7.
- [4] 陶万强,陈凤旺,过颂新,等. 桃树冠瘿病的发生与预防[J]. 绿化与生活,2001(1):24-25.
- [5] 陈秀光,肖柏辉. 樱花根瘤病防治技术研究[J]. 林业勘查设计,2005(1):72-73.
- [6] 吕平会,李志平,何佳林. 大樱桃根瘤病防治技术[J]. 西北园艺(果树专刊),2007(2):51.
- [7] 李金云,王慧敏,王建辉,等. 根瘤病生防菌 E26 菌株产生细菌素的初步研究[J]. 中国农业科学,2004,37(12):1860-1865.
- [8] 马建军,张立彬. 野生欧李生长期矿质营养元素含量的变化[J]. 园艺学报,2004,31(2):165-167.
- [9] 张蕾光,高丽,邓秋贤. 欧李栽培技术及开发前景[J]. 特种经济动植物,2008,11(6):49-50.
- [10] 李学强,李秀珍,司凤云,等. 不同贮藏条件及生长调节剂对欧李花粉生活力的影响[J]. 西北植物学报,2007,27(11):2251-2256.
- [11] 鲁婷,陈能汪,陈朱虹,等. 九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义[J]. 环境科学,2013,34(9):3430-3436.
- [12] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学,2016,37(4):1389-1396.
- [13] 卢少勇,许梦爽,金相灿,等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学,2012,33(2):393-398.
- [14] 程先,孙然好,孔佩儒,等. 海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J]. 应用生态学报,2016,27(8):2679-2686.
- [15] 杨洋,刘其根,胡忠军,等. 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(12):3057-3064.
- [16] 李任伟,李禾,李原,等. 黄河三角洲沉积物重金属、氮和磷污染研究[J]. 沉积学报,2001,19(4):622-629.
- [17] 冀峰,王国祥,韩睿明,等. 太湖流域农村黑臭河流表层沉积物中磷形态的分布特征[J]. 农业环境科学学报,2015,34(9):1804-1811.
- [18] 郭海涛,张进忠,魏世强,等. 长寿湖沉积物中磷形态的季节变化特征[J]. 环境科学,2011,32(7):1994-1999.
- [19] RUBAN V, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, PARDO P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370(2/3):224-228.
- [20] 李任伟,李禾,李原,等. 黄河三角洲沉积物重金属、氮和磷污染研究[J]. 沉积学报,2001,19(4):622-629.
- [21] 刘伟,陈振楼,王军,等. 小城镇河流底泥沉积物-上覆水磷迁移循环特征[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):727-730.
- [22] 杨长明,徐琛,尹大强,等. 巢湖城市内河沉积物不同形态磷空间分布特征[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(12):1832-1837.

(上接第102页)

[3] ZHOU F X, GAO X L, YUAN H M, et al. Geochemical forms and seasonal variations of phosphorus in surface sediments of the East China Sea shelf [J]. Journal of marine systems, 2016, 159: 41-54.

[4] WITHERS P J, VAN DIJK K C, NESSET T S, et al. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe [J]. Ambio, 2015, 44(2): 193-206.

[5] 翁焕新. 河流沉积物中磷的结合状态及其环境地球化学意义[J]. 科学通报, 1993, 38(13): 1219-1222.

[6] 尹爱经, 吴鹏羽, 周慧平, 等. 秦淮河干流沉积物磷形态沿程分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1366-1373.

[7] 朱兴旺, 刘光逊, 梁丽君, 等. 天津于桥水库沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 168-173.

[8] 李玉英, 侯任合. 于桥水库富营养化趋势及成因[J]. 水利水电技术, 2001, 28(4): 61-63.

[9] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响: 以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2015, 37(7): 2437-2446.

[10] RUBAN V, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, PARDO P, et al. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment[J]. Journal of environmental monitoring, 1999, 1(1): 51-56.