

上海市郊中小河流氮磷污染特征

胡雪峰¹, 许世远¹, 陈振楼¹, 高效江², 沈铭能¹, 王少平¹ (1. 华东师范大学地理系, 上海 200062; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: ①上海市郊中小河流有很高的氮磷和有机负荷, 其表层水凯氏氮、总磷和 COD_{Cr} 指标均数倍于 V 类水的最大允许值。②由于受纳污染物类型和总量上的差异, 中小河流氮磷污染存在明显的空间分异: 居民区附近的小河流氨氮和磷的污染很重; 主要受农田径流影响的小河流, 氨氮和磷的污染较轻, 但受硝氮污染的风险加大; 养殖场附近的小河流, 氨氮和磷有突发性暴增的现象。③中小河流氮磷污染, 还受河流季节性生态环境演变的影响。随着气温升高和河流表层生物量的增大, 表层水 NH_4^+ 、 NO_3^- 因大量消耗而降低; 有机 N 和颗粒态 P 含量因生物量的增加而上升; NO_2^- 也会因硝化细菌活动的加剧而增加。水溶态磷和总磷也有随着气温和生物活动的增加而增高的趋势, 但还要受到水体 pH、DO 等条件的影响。④在盛夏高温季节, 水流滞缓的小河流表层水和底层水的氮磷指标存在明显分异: 底层水 NH_4^+ 、水溶态磷和总反应态磷含量高于表层水; 而表层水 NO_3^- 和 NO_2^- 含量高于底层水。这种富营养化水质分层现象的产生是夏季河流表层生物量暴增和底泥氮磷释放加剧的必然结果。至秋季, 随着气温的回落, 水质分层现象逐渐减弱。

关键词: 中小河流; 氮磷污染; 空间分异; 季节性生态环境演变; 水质分层

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)06-06-0066

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Pollution in the Middle and Small Creeks, Suburban Shanghai

Hu Xuefeng¹, Xu Shiyan¹, Chen Zhenlou¹, Gao Xiaojiang², Shen Mingneng¹, Wang Shaoping¹ (1. Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: ① The middle and small creeks in suburban Shanghai were under heavy eutrophic condition, with high loadings of nitrogen, phosphorus and organic pollutants. KN, TP and COD_{Cr} of the surface water of them were several times greater than the critical values of Types V, the worst level of water. ② Spatial variations of N and P pollution were observed, as the creeks in different places accepted different types and amounts of pollutants. Affected by domestic sewage, the creeks nearby residential areas were often heavily polluted by NH_4^+ and P. The creeks in agricultural fields were more easily polluted by NO_3^- than by NH_4^+ and phosphorus. The creeks nearby livestock farms often witnessed sudden soaring of NH_4^+ and P. ③ N and P loadings of the creeks were also affected by the seasonal evolution of ecological environment. With the increase of temperature and biomass, NH_4^+ and NO_3^- in the surface water were largely consumed and decreased as a result; while organic N and particle P increased as the enhancement of suspending biological particles. NO_2^- in the surface water increased with temperature as nitrifying bacteria became active. Total P and water soluble P also showed the trend of enhancement with the intensification of biological activities, however, they were also controlled by the condition of pH and DO in the water. ④ At the height of the summer, the surface and bottom water of the creeks differed in N and P loadings. NH_4^+ , soluble P and total reactive P in the bottom water were higher than those in the surface; while NO_3^- and NO_2^- in the surface were higher than those in the bottom. Such water quality stratification inevitably resulted from the enhancement of phytoplankton in the surface water and intensified release of NH_4^+ and P from the sediments. In the autumn, as the temperature decrease, such phenomenon declined gradually.

Key words: middle and small creeks; N and P pollution; spatial variation; seasonal evolution of ecological environment; water quality stratification

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49831070); 上海市教委重点学科基金资助

作者简介: 胡雪峰(1968~), 男, 浙江慈溪人, 博士后, 主要研究方向为水士环境污染和土壤地理学。现在上海大学环境科学与工程系(200072)。

收稿日期: 2001-02-27

上海市地处长江三角洲,地势平缓,河网密布.在上海郊区,中小河流密如蛛网.这些河流,河道狭窄,水流滞缓,又穿越居民区,环绕农田,流经禽畜养殖场,其水质受到人们生活和生产活动的影响很大,氮磷污染是其中最突出的问题^[1,2].中小河流氮磷的超量累积,会诱发水面有毒有害藻类的大量增殖和底质污染元素的释放,影响当地以其为水源的渔业和农业生产,致使产出有害于人体健康的农产品.不仅如此,众多被污河流还会通过水网汇聚到苏州河和黄浦江等大河流中,直接影响大河市区段的水质.

上海地表水污染问题早已引起人们的重视^[3,4].但市郊中小河流,尤其是镇村级小河流,是环保部门水质监测的盲点;因而有关其污染现状和机理方面的第一手资料还很缺乏.笔者等对上海郊区青浦香花桥镇中小流水质进行了长期的定点监测;并对中小河流氮磷污染的现状、机理及规律进行了探讨.

1 样品的采集及分析

1.1 研究地区概况

青浦区位于上海市西郊,地处太湖流域的下游,境内湖荡簇聚,河网密布.其中的淀山湖及与之相连的众多中小河流,是黄浦江上游水系的重要组成部分.中小流水质定点监测点设置在青浦香花桥镇(见图1).

1.2 样品的采集

水样的采集:用采水器离水面 50cm 左右采集河流表层水;采水器轻放入预先测知深度的河流中,接近底部时上提,采得河流底层水.为了使水样有代表性,采样时避免干旱和雨季.本文主要对本年度有季节代表性的 4 次水质监测结果进行讨论,其采样时间分别为 3 月 10 日(早春);6 月 7 日(初夏);7 月 28 日(盛夏);10 月 28 日(秋天).底泥采集:用抓斗掏取河心表层泥样.

1.3 分析测定方法

(1) 水样的分析测定 水样的温度、pH、DO 用便

携式仪器在野外现场测定.水样带回实验室,用纳氏试剂比色法测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;N-(1-萘基)-乙二胺比色法测定 $\text{NO}_2^- - \text{N}$;硝酸根电极法测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定总氮(TN)^[5].凯氏氮(KN)和有机氮(ON)分别通过 TN 减去氧化态氮($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)和无机氮($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)的方法近似获得^[6].水样总磷(TP)、溶解性正磷酸(又称水溶态磷,SP)、溶解性总磷(STP)、颗粒态磷(PP)、总反应态磷(TRP)和 COD_{Cr} 的测定见文献^[5,7].

(2) 底泥的分析测定 采得的新鲜底泥分别用 KCl 浸提法^[6]和碱解扩散法^[8]测定其交换态 NH_4^+ 和碱解态 NH_4^+ ;BaCl₂ 浸提比色法测定 Fe^{2+} ^[6];用 KCl 溶液浸提后,用 N-(1-萘基)-乙二胺比色法和镉柱还原法^[5]测定 KCl 浸提液中的 NO_2^- 和 NO_3^- ,作为新鲜底泥 NO_2^- 和 NO_3^- 含量.底泥在室内风干、磨细、过筛后,测定其 KN、TP 和总 Fe ^[6,8].

2 结果与讨论

2.1 中小河流氮磷污染现状

对香花桥河网水质进行了长期的定点监测.表 1 是河网 24 个监测点今年 4 次水质监测的平均值(取平均值时,去掉个别因突发事件而暴增的数据),反映了中小河流 N、P 污染的总体状况.中小河流表层水 TP 的含量约是《国家地面水环境质量标准》中规定的 V 类水上限 0.2 mg/L 的 2~3.5 倍,重污染河段甚至高出 8~9 倍;KN 约为 V 类水上限 2.0 mg/L 的 2~3 倍,重污染河段接近 10 倍; COD_{Cr} 约为 V 类水上限 25 mg/L 的 3~5 倍.中小河流表层水 DO 值虽然优于 V 类水最小允许值 2 mg/L,但应考虑到监测时间是在白天;到晚上,随着浮游植物光合作用终止,转为吸氧后,表层水的 DO 还会大幅度地下降.总之,上海市郊中小河流正处于严重的富营养化状态,水质普遍劣于 V 类水.

表 1 上海市郊香花桥镇中小河流表层水水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

监测时节	水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH	DO	TP	TRP	SRP	TN	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	COD_{Cr}
早春	9.4	7.3	3.4	0.436	0.374	0.267	11.380	6.236	4.019	0.121	77.35
初夏	28.2	7.8	7.7	0.674	0.515	0.331	6.186	3.323	1.548	0.250	100.71
盛夏	31.8	8.0	5.7	0.532	0.378	0.306	5.493	2.508	0.537	0.278	110.58
秋天	19.6	7.5	3.0	0.710	0.571	0.487	6.200	4.284	0.590	0.103	78.05

香花桥中小河流底泥大部分呈墨黑色(近年受疏浚影响的河流底泥呈浅棕色,如 07 号点).10 个有代表

性的新鲜底泥 COD_{Cr} 和 Fe^{2+} 的含量平均达 89.99 mg/g 和 59.95 mg/kg;KCl 交换态 NH_4^+ 和碱解态 NH_4^+ 平均

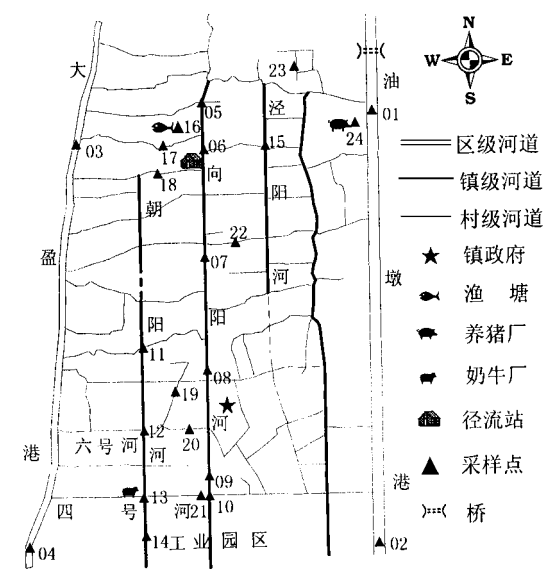


图 1 上海市香花桥镇河流水质监测点分布图
Fig.1 Distribution of the monitoring points in the creeks from Xianghuaqiao Town, suburban Shanghai

高达 348.03 mg/kg 和 457.14 mg/kg;而氧化态氮的含量很低;KN 和 TP 平均高达 3.519 mg/g 和 2078.58 mg/kg(表 2).这说明中小河流底泥有机污染严重,长期处于厌氧状态;由于长期接纳污水污染物,底泥中 N、P 高度累积.然而,底泥不仅仅是 N、P 聚积的“汇”,在一定条件下,“汇”又可转化为“源”,成为河流水体的一大污染源^[9,10].

2.2 中小河流氮磷污染的空间分异

中小河流的 N、P 污染有明显的空间分异.表 3 列举了 6 个具有代表性的监测点在本年度 4 次水质监测中的结果.所选 01、19、11、22、13、18 号点分别取自区级中型河流,以及集镇居民区、集镇居民区南端、村级居民区、奶牛养殖场和园林花木场附近的镇村级小河流.总体上看:①居民区附近小河流易受 NH₄⁺ 和 P 的重度污染,而且人口越密集,污染越严重.如位于集镇居民区的小河流(19 号点),受 NH₄⁺ 和 P 的污染最严重,表层水 TP 的含量终年高于 1 mg/L,最高时甚至接近 2 mg/L;SP 和 TRP 的含量多数时候超过 1 mg/L;NH₄⁺ 的含量多数时候超过 10 mg/L;唯氧化态氮的含

表 2 上海市郊香花桥镇中小河流底泥的污染物负荷

Table 2 Loadings of contaminants in the creek sediments from Xianghuaqiao Town, suburban Shanghai

监测点	交换态 NH ₄ ⁺ / mg·kg ⁻¹	碱解态 NH ₄ ⁺ / mg·kg ⁻¹	KN / mg·g ⁻¹	TP / mg·kg ⁻¹	NO ₂ ⁻ / mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ / mg·kg ⁻¹	COD _{Cr} / mg·g ⁻¹	交换态 Fe ²⁺ / mg·kg ⁻¹	总 Fe / mg·g ⁻¹
01	150.329	243.648	2.171	1369.469	0.003	1.546	36.43	28.770	52.037
07	82.590	90.469	1.243	858.453	0.946	2.606	22.92	0.289	42.955
09	285.078	424.430	5.277	1581.204	0.000	1.075	100.85	94.032	35.889
10	376.380	527.837	5.189	953.843	0.007	1.555	138.51	85.607	33.231
11	106.567	242.579	3.563	1015.637	0.003	0.837	94.25	3.641	29.362
13	1270.076	1273.389	5.964	2409.543	0.006	1.204	181.21	206.755	52.381
15	253.651	393.844	2.703	1265.019	0.038	1.446	51.20	27.856	35.849
17	119.327	213.313	2.300	2937.625	0.000	1.233	53.03	30.153	43.277
19	700.506	919.899	3.975	5813.838	0.026	0.389	128.52	73.694	38.486
22	135.789	241.984	2.804	2581.203	0.003	1.022	92.96	48.742	21.531

量较低.相比之下,位于村级居民区的小河流(22 号点),由于接纳生活污水的量减少,河中又有大量水生高等植物的净化作用,受 NH₄⁺ 和 P 的污染程度减轻.②远离居民区,主要受农田径流影响的小河流, NH₄⁺ 和 P 的污染负荷明显减小,但受 NO₃⁻ 污染的风险加大.显然与 NH₄⁺ 和 PO₄³⁻ 易被土壤颗粒吸附有关.最典型的是 18 号点.据调查,在 5 月至 8 月间,由于花木场长期用牛粪作肥料,其田间水 NO₃⁻ 的含量平均高达 17.67 mg/L.受此影响,该河流 5 月中至 8 月底, NO₃⁻ 含量一直高于 8 mg/L,但 NH₄⁺ 和 P 的含量较低.③奶牛养殖场附近小河流(13 号点),由于受到牲畜粪尿任

意排放的影响,水体中的 NH₄⁺ 和 P 有突发性增加的现象.早春时, NH₄⁺ 和 TP 一度高于 100 mg/L 和 8 mg/L,对周围河段构成严重威胁.上海市郊禽畜养殖业发达^[1,11],禽畜排泄物一向是郊区水域的一大威胁.迄今为止,养殖业的污染负荷已占全市污染总量的近 1/3,相当于 800 万市民的排污量.④区级河流(01 号点)河道宽阔,水流较快,船舶往来频繁,其水质不仅受当地各种污染源的影响,还受控于太湖流域来水质量.因而其水质与镇村级小河流有明显差异.总的来看,区级河流水质优于邻近居民区和养殖场,受重度污染的小河流水质,但劣于居民稀少,生态自净功能较强的小河流

表 3 香花桥中小河流氮磷污染的空间分异/ mg·kg⁻¹

Table 3 Spatial variations of nitrogen and phosphorus pollution in the middle and small creeks in Xianghuaqiao Town , suburban Shanghai

监测时节	监测点	TP	TRP	SP	TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
早春	01	0.240	0.231	0.117	10.084	5.836	4.063	0.132
	11	0.332	0.305	0.190	12.666	7.860	4.494	0.145
	13	8.639	7.812	6.806	134.531	130.63	2.090	0.012
	19	1.547	1.428	1.061	18.210	14.229	0.510	0.094
	22	0.163	0.080	0.000	7.624	1.986	5.497	0.098
初夏	01	0.631	0.571	0.371	6.654	4.910	1.337	0.239
	11	0.809	0.552	0.279	5.287	2.580	0.808	0.379
	13	1.396	0.736	0.472	7.601	5.475	0.571	0.305
	18	0.108	0.048	0.013	10.108	0.580	8.896	0.392
	19	1.217	0.827	0.582	7.644	5.639	0.840	0.185
	22	0.428	0.355	0.197	2.540	1.428	0.748	0.145
盛夏	01	0.347	0.304	0.207	5.693	3.986	0.717	0.301
	11	0.539	0.313	0.251	4.235	0.781	0.451	0.331
	13	0.591	0.405	0.303	5.524	1.858	0.512	0.345
	18	0.192	0.182	0.137	3.454	0.447	0.542	0.533
	19	1.727	1.382	1.316	14.590	9.190	0.258	0.054
	22	0.478	0.383	0.329	2.566	0.268	0.441	0.138
秋天	01	0.530	0.483	0.295	6.433	4.064	1.082	0.200
	11	0.677	0.643	0.549	6.877	4.798	0.449	0.090
	13	0.634	0.615	0.530	6.496	4.378	0.350	0.109
	18	0.051	0.013	0.013	3.897	0.00	2.437	0.069
	19	1.424	1.320	1.170	12.942	10.460	0.279	0.028
	22	0.474	0.436	0.370	3.622	1.914	0.689	0.087

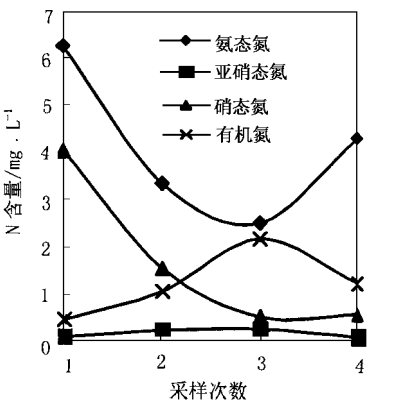


图 2 香花桥中小河流表层水氮的季节性变化
Fig.2 Seasonal variations of nitrogen in the surface water of the middle and small creeks in Xianghuaqiao Town , suburban Shanghai

水质.总之,由于受纳污染物的途经、类型和总量上的差异,小河网不同地点的河段 N、P 污染程度不一样,由此也揭示了中小河流受污的主要原因.

中小河流污染的空间分异也能在其底泥中得到反

映,主要表现在底泥污染物负荷上.表 2 表明:奶牛养殖场附近河流(13 号点)底泥 NH₄⁺、KN 和 COD_{Cr}均居各监测点之首,TP 含量仅次于 19 号点;而集镇居民区小河流(19 号点)底泥 TP 最高,达 5813.838 mg/L,是其它河流的 2~5 倍,NH₄⁺ 和 KN 含量仅次于 13 号点.说明水体重度污染的河段其底泥的污染也很重.

2.3 中小河流氮磷污染的季节性演变

中小河流 N、P 污染还存在季节性变化.图 2 表示了河流表层水 3 N(NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻) 和 ON(有机氮) 的季节性变化趋势,与河流生态系统的演变十分吻合.早春时节,河流表层生物量低,水生植物也尚未苏复, NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 由于累积含量较高,但 ON 的含量较低;到了夏季,尤其是盛夏季节,河流表层在适宜的温光条件下,藻类等浮游生物暴增, NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 由于被大量消耗而急剧减少,但 ON 的含量却因生物量的增加而提高;至秋季,由于气温回落,生物量降低, NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 又开始回升,而 ON 趋于减少.

值得注意的是,河流表层 NO₂⁻ 含量有随着气温增高而增加的趋势,与 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的变化规律不一致.

NO_2^- 在硝化和反硝化作用过程中都可以产生,显然,对 O_2 很敏感的反硝化细菌不可能在河流表层活动;而大多数硝化细菌在 $25 \sim 30\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{DO} > 1.2\text{ mg/L}$ 和微碱的条件下,活性最强^[12,13],因而夏季河流表层 NO_2^- 含量的增加,应与硝化细菌活动的增加有关.由于 NO_2^- 有很强的生物毒性,夏季河流水体 NO_2^- 的增高会对人畜构成威胁,因而对中小河流夏季 NO_2^- 升高机理应作进一步探讨.

图 3 描述了河流表层水 TP、SP 和 PP 的季节性变化趋势.由于河流表层的悬浮态颗粒大部分是生物颗粒,其 PP 含量的变化与河流表层生物量的变化基本同步.河流表层 SP 和 TP 的变化较复杂:从春季到夏季基本随着气温和生物量的增加而增高;至秋季时,不但没回落,反而增加.若不考虑外源污染变化因素,夏季 SP、TP 升高应是气温升高和生物活动加剧使内源 P 释放增加之故^[14];秋季 SP、TP 继续上升,一方面与浮游生物大量死亡,释出 P 素有关,另一方面可能是水面 pH、DO 降低(表 1),利于内源 P 释放的缘故^[9,10].

2.4 中小河流水质的季节性分层现象

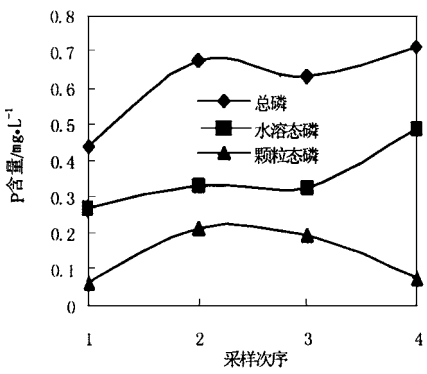


图 3 香花桥中小河流表层水磷的季节性变化

Fig.3 Seasonal variations of phosphorus in the surface water of the middle and small creeks in Xianghuaqiao Town, suburban Shanghai

在盛夏高温季节,中小河流表层水和底层水的 N、P 指标表现出分异(图 4):底层水 NH_4^+ 、SP 和 TRP 高于表层水;而 NO_3^- 和 NO_2^- 低于表层水.表层水的 pH 和 DO 明显高于底层水.大部分水流滞缓的小河流,这

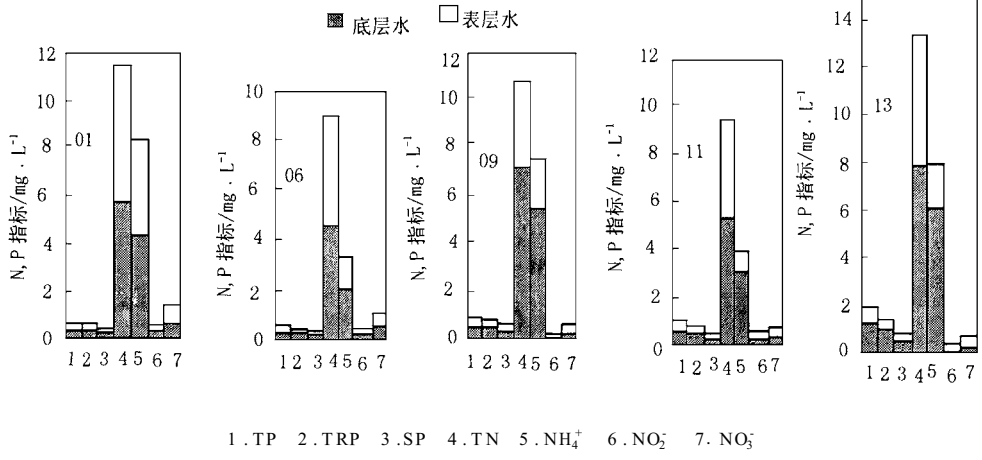


图 4 盛夏中小河流表层水、底层水氮磷负荷比较

Fig.4 Comparison of N and P loadings in the surface water with those in the bottom water from the middle and small creeks at the height of the summer

种水质分层现象十分显著;区级河流,由于水流相对较快,又受往来船舶运行的影响,不很明显(01 号点).水质垂直分层现象本来只有在较深的湖泊中才会产生,而中小河流大多水深不足 3 m;产生这种现象的主要原因是夏季河流表层生物量的暴增和底泥 N、P 释放的加剧.夏季河流表层良好的温光条件和丰富的营养物质,使藻类等浮游生物大量增殖, NH_4^+ 被大量消耗或转化,而 pH 和 DO 因光合作用增强而增加.另一方面,表层生物量的增加使水体透光性变差,导致底层水光

合作用减弱;加上污染底泥在夏季高温下强度耗氧,使得河流底部 DO 急剧下降.河流底层水在缺氧状态下,硝化细菌活动减弱,使得氧化态氮(NO_3^- 和 NO_2^-)的含量普遍低于表层水;但底泥 NH_4^+ 和 P 释放加剧,使底层水 NH_4^+ 、SP 和 TRP 的含量高于表层水;有机质在河流底部的厌氧分解,产生有机酸,又使底层水 pH 降低.应注意的是:底泥耗氧及污染物厌氧释放在水质分层中起着重要作用.如 13 号点底泥 N、P 和有机污染最重,其底、表层水质分异现象也最明显.

至秋季,随着气温的回落,河流表层浮游植物大量死亡,光合作用减弱;而底泥耗氧和氮磷释放也减弱,

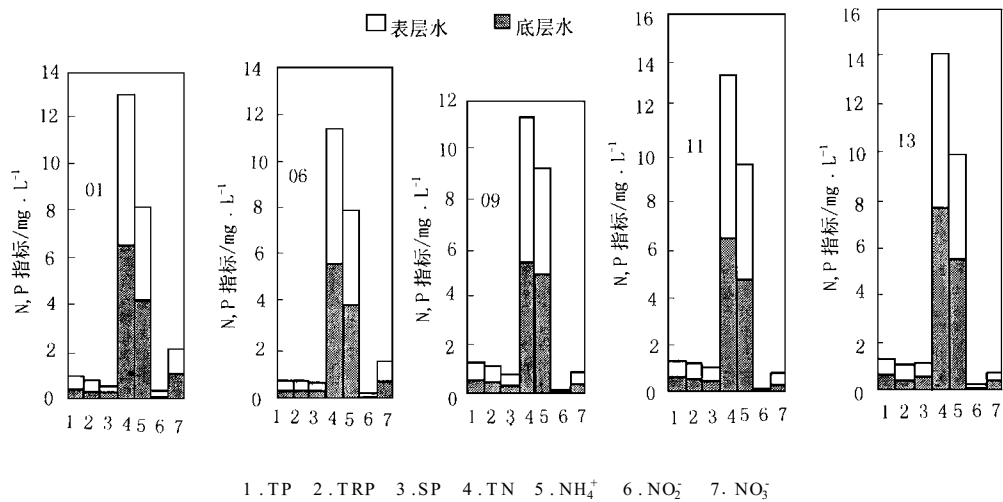


图 5 秋季中小河流表层水 底层水氮磷负荷比较

Fig. 5 Comparison of N and P loadings in the surface water with those in the bottom water from the middle and small creeks in the autumn

使水质分层趋于缓和(图 5)。

3 结论

(1)上海郊区中小河流 N、P 污染严重,河流表层水 KN、TP 和 COD_{Cr} 指标均数倍于 V 类水的上限。

(2)中小河流 N、P 污染存在明显的空间分异:居民区附近的小河流 NH_4^+ 和 P 的污染很重;主要受纳农田径流的小河流,受 NO_3^- 污染的风险加大;养殖场附近的小河流, NH_4^+ 和 P 有突发性暴增的现象。

(3)中小河流 N、P 污染还受河流季节性生态环境演变的影响。随着气温升高和河流表层生物量的增大,表层水 NH_4^+ 、 NO_3^- 因大量消耗而降低;ON 和 PP 含量因生物颗粒的增加而加大; NO_2^- 也会因硝化细菌活动的加剧而增加.SP 和 TP 有随着气温升高和生物活动加剧而增高的趋势,但还要受到水体 pH、DO 等条件的影响。

(4)在盛夏高温季节,水流滞缓的小河流产生明显的水质分层现象:底层水 NH_4^+ 、SP 和 TRP 含量高于表层水;而表层水 NO_3^- 和 NO_2^- 含量高于底层水;表层水的 pH 和 DO 高于底层水.至秋季,随着气温的回落,这种现象逐渐减弱。

参考文献:

1 黄沈发,陈长虹,贺军峰.黄浦江上游汇水区畜禽业污染及防止对策.上海环境科学,1994,13(5):4~8.

2 上海水利志编辑委员会.上海水利志.上海:上海社会科学出版社,1997.114~124.

3 郑英铭,高建群.苏州河的水质特征.环境科学,1988,9(5):20~26.

4 张大弟,张晓红,章家骥等.上海市郊区非点源污染综合调查评价.上海农业学报,1997,13(1):31~36.

5 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法(第三版).北京:中国环境科学出版社,1998.252~366.

6 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.138~230.

7 Marie E Bradford, Robert Henry Peters. The relationship between chemically analyzed phosphorus fractions and bioavailable phosphorus. Limnol. Oceanogr., 1987, 32(5), 1124~1137.

8 劳家桎.土壤农化分析手册.北京:农业出版社,1988.241~280.

9 Marcia H Bates, Nancy Jo E Neafus. Phosphorus release from sediments from lake carl Blackwell, Oklahoma. Water Research, 1980, 14: 1477~1481.

10 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治.北京:中国环境科学出版社,1988.78~115.

11 熊云旦.重视市郊中小河流的污染治理.上海环境科学,1997,16(7):44.

12 徐亚同.废水中氮磷的处理.上海:华东师范大学出版社,1994.23~53.

13 Samantha B Joye, Tracy L Connell, Laurence G Miller et al. Oxidation of ammonia and methane in an alkaline, saline lake. Limnol. Oceanogr., 1999, 44(1):178~188.

14 王晓蓉,华兆哲,徐菱等.环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响.环境化学,1996,15(1):15~19.