

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市秋冬季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎春,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析

陈诗文,袁旭音*,金晶,李正阳,许海燕

(河海大学环境学院,南京 210098)

摘要: 支流是干流营养物质的重要贡献源,也是流域水污染控制的关键区域. 为探明西苕溪营养物质来源,有效控制该流域的水质污染,对西苕溪支流河口水质的时空变化特征及营养盐的输出通量进行了分析,利用 PMF 源解析模型对西苕溪 10 条典型支流的污染源贡献进行了定量解析. 结果表明,中下游支流的 TN、TP 浓度高于上游支流,枯水期 TN、TP 浓度均值是 $4.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,丰水期对应浓度均值为 $3.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,枯水期高于丰水期,其时空变化较显著;支流水体的氮磷形态组成各不相同,反映支流流经区域周围土地利用的差异. 污染源解析结果显示,影响西苕溪支流营养盐的污染源有农田径流、养殖废水和生活污水三类,在丰水期和枯水期,上游支流营养盐中农田径流的贡献率是 40% 和 35%,中游养殖废水贡献率是 33% 和 30%,而枯水期的生活污水则比丰水期贡献较多营养盐. 因此,在整治改善西苕溪流域水质时,应考虑营养物的时空变化特点和支流周边环境.

关键词: 营养盐; 时空变化; PMF 方法; 支流; 西苕溪

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4179-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201605168

Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitiaoxi Watershed

CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin*, JIN Jing, LI Zheng-yang, XU Hai-yan

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The input of tributary is the important source of nutrients to the main stream, and it is the key area for water pollution control of watershed. In order to explore the sources of nutrient and seek the effective measures to control the river pollution, the spatial and temporal variations of aquatic parameters and the output of nutrient flux in the tributary outlets of Xitiaoxi watershed were analyzed. The quantitative analysis concerning the contribution of pollution sources from 10 typical tributaries was carried out, using the PMF analytical model. The results showed that the TN and TP concentrations were higher in the middle and lower reaches. In the temporal scale, the concentrations of nutrients in the dry season were higher than those in the wet season. In the dry season, average concentrations of TN and TP were $4.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, compared to the corresponding values of $3.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in wet season. Because of the differences of surrounding lands, the sources of nitrogen and phosphorus forms were various. The results of PMF (Positive Matrix Factorization) method identified the three nutrient sources as agricultural source, aquaculture source and municipal source. In different seasons and river reaches, the contribution rates of three sources were different. Agricultural source contributed nutrient largely to the tributaries in the upstream reaches, and the aquaculture source was the main contributor in the middle reaches, while the municipal source contributed more nutrient in the wet season than in the dry season. Therefore, to better improve water quality of Xitiaoxi watershed, the surrounding environment of tributary and the characteristics of nutrients in spatial and temporal variations should be considered.

Key words: nutrient; spatial and temporal variations; PMF method; tributary; Xitiaoxi watershed

随着工农业的发展,营养盐可以利用不同途径进入水体中,而氮磷浓度不断增长,将导致河湖水质的恶化^[1,2],因此分析流域水体营养盐状况是管理流域环境的必要步骤. 通常情况下,流域支流的分布面积较广,它们接纳了流域的大量营养盐,这些营养盐最终汇入干流^[3,4]. 西苕溪属于太湖的补给水系,其水量大约占苕溪流域总入湖量的 50%,其中支流对干流具有较大的贡献,因此,研究不同支流河口氮磷的时空分布和来源特点,分析支流氮磷营养盐对干流的贡献,可为西苕溪的水环境变化提供基础数据,为太湖流域水环境治理提供相关依据.

近年来,利用水体参数判别污染源的研究时有报道,其中由 Paatero 等^[5]提出 PMF 模型,是一种新型因子分析方法,在不需测量源成分谱的情况下,利用分解矩阵中数据的标准偏差进行优化,鉴别出源因子,然后分配污染源. 在最近的研究中,很多学者应用 PMF 模型研究了水体污染物来源,定量地分析

收稿日期: 2016-05-24; 修订日期: 2016-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354); 科技部国际科技合作专项(2012DFA60830); 江苏高校品牌专业建设工程项目

作者简介: 陈诗文(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: 15295527102@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xy_hjy@hhu.edu.cn

污染源对水体的影响^[6-9]. 本文针对西苕溪支流河口采集水样, 研究相关营养盐指标的时空变化, 将测定的水质参数应用 PMF 模型对营养盐污染源进行定性解析, 分析支流营养盐的输出变化以及不同污染源对支流营养盐的贡献, 以期制定改善西苕溪水质的策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西苕溪流域面积约为 2 268 km², 河流干流长约 139 km, 是太湖的重要补给水系. 它发源于天目山, 地势由西南到东北的高度逐步下降. 多年平均气温约为 15.5℃, 多年平均降水量约为 1 465.8 mm, 属亚热带季风气候; 径流年际变化较为明显, 且与降雨量保持较高一致性^[10]. 流域内土地利用类型主要包括耕地、林地、草地等, 中上游以山地丘陵为主, 主要是人工园林、竹林、茶园等, 下游地区以平原为主, 水稻田居多, 期间分布各类菜地、苗木种植地等; 居民区在上游零星分布, 中下游相对密集. 研究区域与采样点如图 1 所示.

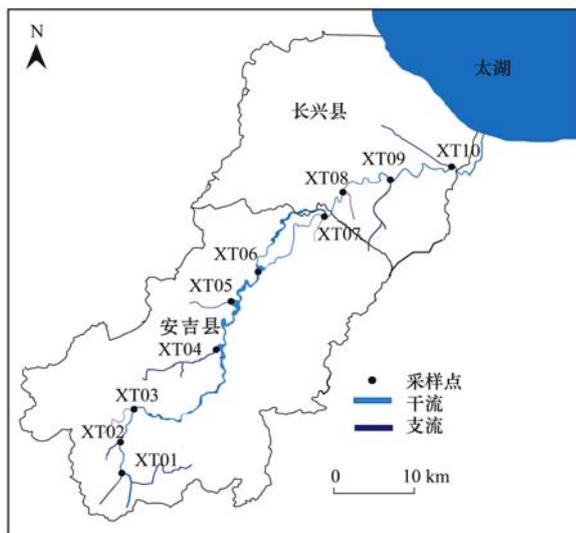


图 1 西苕溪采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xitiao catchment

1.2 样品采集及分析

为研究支流营养盐输出的特点, 采集西苕溪 10 个支流与干支流汇合处的水样, 并在丰水期(7 月)和枯水期(12 月)进行分批采样. 遵循水样采集操作规范, 在每个支流河口附近设置 6 个采样点, 均采集 0.5 m 以上表层水, 以代表支流断面的水质状况. 在样品采集的同时, 采用 LB70-1C 悬杯式流速仪进行流速测定, 利用多功能水质检测仪测定温度、pH、

溶解氧、COD 等水质指标. 采集的水样加酸保存, 很快运到实验室, 按国家标准方法对水样中氨氮、硝氮、总氮、溶解性磷、颗粒态磷和总磷指标进行测定^[11]. 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化法, 硝氮(NO₃⁻-N)采用紫外分光光度法, 氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂法, 总磷(TP)和总溶解磷(TDP)采用过硫酸钾氧化法测定.

1.3 PMF 源分析方法

PMF 方法将污染物浓度矩阵分解成源贡献和源成分谱两个矩阵, 利用源贡献矩阵和源成分谱矩阵可以判别污染物的来源, 并计算每个来源的贡献率. 此模型中, 组合公式表示方法:

$$X = GF + E$$

输入样品浓度矩阵(X)由 n 个样品的 m 种化合物的浓度组成($n \times m$), X 矩阵中行是由一个样品中所含有的化学物质浓度构成, 列是由每个样品的所含同一种化学物质的浓度. G 与 F 是影响因子矩阵, G 系指得分矩阵, 即源贡献率矩阵($n \times p$), 其中 p 为贡献率; F 系指因子负载矩阵, 即源成分谱矩阵($p \times m$), E 代表残差矩阵($n \times m$), 即 X 中不确定性部分.

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$

$$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p)$$

式中, x_{ij} 、 g_{ik} 、 f_{kj} 分别为实测浓度矩阵、源贡献率矩阵和源成分谱矩阵的元素, e_{ij} 是残差矩阵中的元素, 通常是输入值与预测值之间的差值; p 表示多个不同的源份额. 上述分解问题可以转化为求解 $Q(G, F)$ 最小值的优化问题.

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [e_{ij}/s_{ij}]^2$$

式中, S_{ij} 表示第 i 个样品中第 j 种污染物浓度的不确定性, 即为 X 的标准偏差, 其他符号含义同前所述. $Q(E)$ 是该模型判据之一, 只有在其收敛时, 该模型才可进一步运行. 模型中数据的不确定性计算方法如下.

当 $x_{ij} \leq \text{MDL}$ 时:

$$s_{ij} = \frac{5}{6} \times \text{MDL}$$

当 $x_{ij} > \text{MDL}$ 时:

$$s_{ij} = [(\text{RSD} \times x_{ij})^2 + (\text{MDL})^2]^{1/2}$$

式中, MDL 表示的最低检测限; RSD 表示浓度值的相对标准偏差.

模型中反复运算矩阵 G 和 F 中的非负值, 目的

是使 Q 值达到最小, 趋于自由度值. Q_{robust} 表示去除群值计算值, $Q_{\text{theory}} = n \times m - f \times (n + m)$, n 是污染源种类数, m 是样品数, f 是因子数. PMF 模型运算关键一步是确定因子数, 当 Q_{robust} 与 Q_{theory} 绝对值最接近于零时所对应的因子数是最佳运行因子数.

本实验数据采用 Origin 8.0 和 EPA PMF 5.0 等软件进行统计分析和画图.

2 结果与讨论

2.1 西苕溪支流河口水质特征的时空变化

2.1.1 西苕溪支流河口的主要水质指标特征

表 1 是采集水样数据的统计结果, 对照 GB 3838-2002 地表水水质标准, 西苕溪支流的水质总体良好, 化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)等均值都达到Ⅲ类水质标准. 参照Ⅲ类水质标准, 10 条支流的总氮含量大部分均超标; XT04 和 XT10 两

条支流部分样品的氨氮超标, 约占 20%; XT08 支流水体总磷只在枯水期时有超标现象, 仅占 5%; XT06、XT07 部分采样点的 DO 只在丰水期时略有超标, 其余支流的水质指标在不同时期都低于Ⅲ类水质标准.

由表 1 分析可知, 丰水期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均值分别为 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 值分别约为 1.1% ~ 46.9% 和 33.3% ~ 50.4%; 溶解性磷(TDP)含量均值为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 TP 的 25.8% ~ 46.1%, 颗粒态磷(PP)均值为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 TP 的 26.5% ~ 77.5%; 枯水期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均值为 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占 TN 的 47.0% ~ 71.7%, TDP 含量均值为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PP 均值为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PP/TP 为 50.6% ~ 78.5%. 由此可见, 西苕溪支流水体的氮磷分别以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 PP 形式为主.

表 1 西苕溪支流出口的主要水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Statistics data of main water quality indexes in outlet of Xitiaoxi tributaries/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质标准	丰水期				枯水期				国家水质Ⅲ类标准
	最大值	最小值	平均值	标准偏差	最大值	最小值	平均值	标准偏差	
DO	7.97	4.88	6.27	1.28	8.25	6.02	7.10	0.55	≥ 5
TN	3.93	2.01	3.15	0.68	5.92	3.48	4.25	0.71	≤ 1.0
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	1.66	0.02	0.66	0.47	1.26	0.54	0.88	0.33	≤ 1.0
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	1.82	1.05	1.27	0.21	3.27	2.03	2.55	0.44	≤ 10
TP	0.14	0.03	0.09	0.03	0.21	0.07	0.11	0.04	≤ 0.2
PP	0.09	0.01	0.06	0.03	0.10	0.04	0.07	0.02	
TDP	0.04	0.03	0.03	0.01	0.10	0.02	0.04	0.03	
COD	13.80	6.50	10.95	2.54	15.50	8.80	12.35	2.35	≤ 20

2.1.2 西苕溪不同支流河口营养盐特征的时空变化

根据现有的研究资料, 西苕溪支流的氮磷污染物主要来自面源, 其中包括农田耕种中肥料的流失、农村养殖以及居民生活污水等污染源^[12], 而这些污染物易随支流水体的地形地貌、土地利用方式、水生植物分布等发生变化, 进而影响氮磷的含量和形态^[13~15].

由表 2 可知, 无论是丰水期或是枯水期, 中下游河段的大部分支流的 TN、TP 浓度均较高, 其中丰水期的 XT06 支流和枯水期的 XT04 支流的 TN 含量最高. 由于 XT06 支流附近大多分布农田耕种地, 肥料会因农田排水而进入水体, 而据相关研究统计, 苕溪夏季肥料利用率仅占施肥量的 30% ~ 35%^[16,17]; XT04 支流附近不仅有林地耕地, 也有小型养殖场, 产生污染负荷含 TN 高; 而 XT07 支流的 TN 浓度最低, 这主要是因为 XT07 支流附近大多为林地, 居民

密度较小, 产生 TN 的负荷较小. 丰水期的 XT10 和枯水期的 XT08 的 TP 含量最高, XT10 是在湖州境内农村区, 家禽养殖和生活污水较多, 因集中收集处理率低, 使得排放入附近水体的 TP 浓度偏高^[16], XT08 附近有市政污水排放, 增加了 TP 负荷.

多数支流的 TN、TP 含量在枯水期高于丰水期, 这是由于枯水期降雨量少、流量小, 水体对氮磷稀释能力减弱; 而且在低温环境下, 水体中动植物、微生物的生物活性及代谢能力降低, 对氮磷的消耗能力减弱^[18]; 丰水期雨水丰足, 一方面氮磷被稀释, 另一方面适宜生长的水生生物也吸收了部分氮磷, 降低了氮磷的浓度. 进一步对比分析各个支流在两个时期氮磷营养盐含量, XT04 支流的 TN, XT08 的 TP 含量差别最显著, 这是因为在 XT04、XT08 两条支流的采样处的河道窄, 水流缓, 因而河水的流动性差, 交换能力较弱, 导致氮磷含量受到污染负荷的影响大.

表 2 西苕溪支流出口的 TN、TP 含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和相关比值统计

Table 2 TN, TP contents and related ratio statistics in outlet of Xitiaoxi tributaries

采样点	丰水期					枯水期				
	TN	TP	TN/TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$	TDP/PP	TN	TP	TN/TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$	TDP/PP
XT01	2.08	0.05	38.60	0.46	0.86	3.57	0.06	55.02	0.37	0.57
XT02	2.56	0.03	77.21	0.41	0.52	3.60	0.08	46.04	0.42	0.38
XT03	3.51	0.06	56.72	0.73	0.81	4.38	0.09	48.10	0.29	0.31
XT04	3.54	0.09	30.00	1.27	0.35	5.92	0.12	63.77	0.38	0.65
XT05	3.52	0.10	36.96	0.38	0.46	4.12	0.11	38.29	0.41	0.27
XT06	3.93	0.13	30.57	0.27	0.46	4.50	0.14	32.79	0.60	0.71
XT07	2.01	0.11	19.03	0.02	0.39	3.48	0.10	33.39	0.09	0.48
XT08	3.32	0.12	28.86	0.19	0.36	4.10	0.20	20.05	0.21	0.98
XT09	3.36	0.08	39.70	0.60	0.55	4.26	0.10	40.69	0.28	0.50
XT10	3.63	0.14	26.81	0.82	0.47	4.56	0.15	30.82	0.40	0.68
均值	3.15	0.09	38.45	0.52	0.54	4.25	0.11	40.89	0.35	0.57

TN/TP(质量比)是水体营养状态的重要影响因素,根据已有的报道,当 TN/TP > 22 ~ 30 时,水体中磷为限制因素;当 TN/TP < 7 ~ 10 时,氮为限制因子^[19-21];参照聂泽宇等^[16]的研究,本文采用 TN/TP < 7 和 > 30 作为氮限制和磷限制的临界参考值.如表 2 所示,丰水期时 TN/TP 为 19.03 ~ 77.21,大部分支流的 TN/TP 值大于 30,说明西苕溪支流入口氮素充足,基本处于磷限制状态;部分支流如 XT07、XT08、XT10 的 TN/TP 值介于 7 和 30 之间,N 和 P 是共同影响因子,对藻类生长繁殖有利.这些支流基本位于西苕溪下游地段,营养物的污染负荷较大,在适宜的气候条件下易成为富营养化敏感区^[22,23].枯水期除支流 XT08 的 TN/TP 值为 20.05,其余支流的质量比值均高于 30,因此枯水期支流水体基本处于磷限制的状态.

由表 2 可知,相对于丰水期,枯水期时 XT04 支流的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 值下降最多,XT06 上升最多.主要是由于枯水期时 XT04 的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度减少,XT06 的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度升高.由于 XT04 附近养殖活动较为密集,枯水期时鱼虾养殖减少,鱼虾饵料投加量减少,产生的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷量就相应减少,而且枯水期水量少,水流缓慢,水体中部分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 会逐步沉积于沉积物表层,导致水体中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 量降低^[24];XT06 附近有采砂运输船航行,沉积物中累积的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 易受到扰动向水体释放,从而导致其含量上升^[25].相对于丰水期,枯水期时 XT03 支流的 TDP/PP 值降低幅度最大,XT08 支流的值增加最多,其中 XT03 的 TDP 浓度减少,XT08 的 TDP 浓度升高,PP 浓度均有上升,但 XT03 增加较多.XT03 支流附近较多的农田沟渠,是截留和转化农业非点源污染物的重要场所^[26],冬季施肥量减少,径流中的 TDP 也

明显降低^[27].XT08 周围以林地为主,且采样点处的河面有较多的水生植物,部分 PP 被植物吸收而导致 TDP/PP 的升高,而较少的降雨量也会减轻林地对 TDP 的削弱^[28,29].综上所述,西苕溪不同支流在不同时期的营养盐特征与土地利用和水文条件密切相关.

2.2 西苕溪支流营养盐输出通量

支流营养盐的输入影响苕溪干流营养盐总体负荷,进而将影响太湖的水质状况.将支流视作营养盐排放通道,这些营养盐输出负荷反映了支流对干流的贡献.计算公式为:营养盐通量($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) = 营养盐浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) × 流量($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),计算得到的结果如图 2 所示.丰水期这些支流 TP 总的输出通量为 $8.72 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,TN 的输出通量为 $294.44 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$;枯水期 TP 的总输出通量是 $3.86 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,TN 的输出通量为 $146.35 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,因而枯水期的营养盐输出大体上只有丰水期的一半.对比分析发现,无论是丰水期还是枯水期,XT10 支流的 TN、TP 通量均显著高于其他支流,这主要是与该采样点位于湖州市内,城镇区居多,较多含氮磷元素的生活污水直接排放进入附近支流,使得水体中氮磷营养元素累积,浓度偏高,加之该处河面较宽,流量较大,约有 $93.2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;而 XT07、XT08 支流的 TN、TP 输出通量均较低,由于支流位于苕溪弯道处,水中有大型水生植物,使得支流流速较小(经现场测定:XT07、XT08 流速为 $0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其他支流流速均在 $0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,XT01、XT05、XT10 流速分别是 0.37 、 0.13 、 $0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)从而减少了流量.

以流量 Q 为自变量,分别以 TP、TN 浓度为因变量做回归性分析,结果如图 3 所示,TP、TN 输出与流量均为显著正相关,而 TP 在两个不同时期输

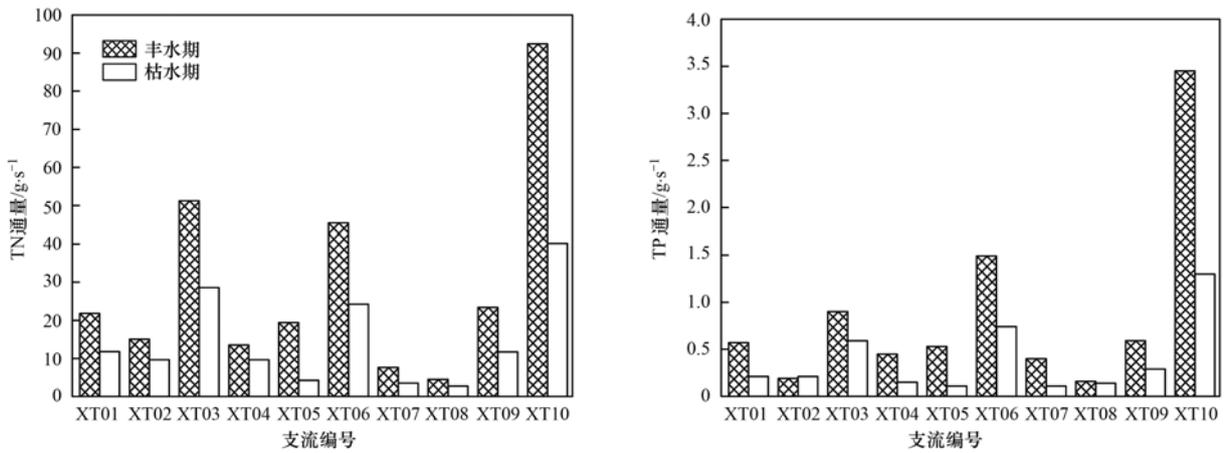


图 2 西苕溪支流营养盐通量
Fig. 2 Nutrient flux of tributaries in Xitiaoxi River

出量与流量的相关性弱于 TN 与流量之间的相关性。王晓燕等^[30]曾在研究中指出,降雨及地表径流能够补充氮素,而磷素在自然界中的迁移速率远弱于氮素,且在迁移过程中易被截留,通常易以颗粒态形式流失。由苕溪水质数据分析可知,水体中 TP 主要是以 PP 为主,因此流量与 TP 的相关性相对弱于 TN。

2.3 西苕溪支流营养盐的源贡献分析

采用 PMF 模型对水质参数赋予 3~6 个因子进行模拟计算。当污染源因子数为 3 时(F1~F3),模型拟合条件最优。根据主要污染物对各因子的贡

献,可以基本确定典型的污染源;然后,根据不同污染源对支流水体的贡献份额,可以分析不同支流污染源贡献的时空差异^[19]。

2.3.1 西苕溪支流的污染源解析

由表 3 可知,丰水期时因子 1 中, TN 比 TP 贡献率大,其中硝态氮(NO_3^- -N)比铵态氮(NH_4^+ -N)所占比例高,达 55.8%, COD 负载贡献率达到了 38.32%, DO 的负载更是高达 67.8%,初步判断该污染源是以 NO_3^- -N 为主且携带部分有机物的含氮污染源,符合农田径流的基本特征^[31]。在因子 2 中, TP、PP、TDP 的贡献率均高于其他参数,分别为

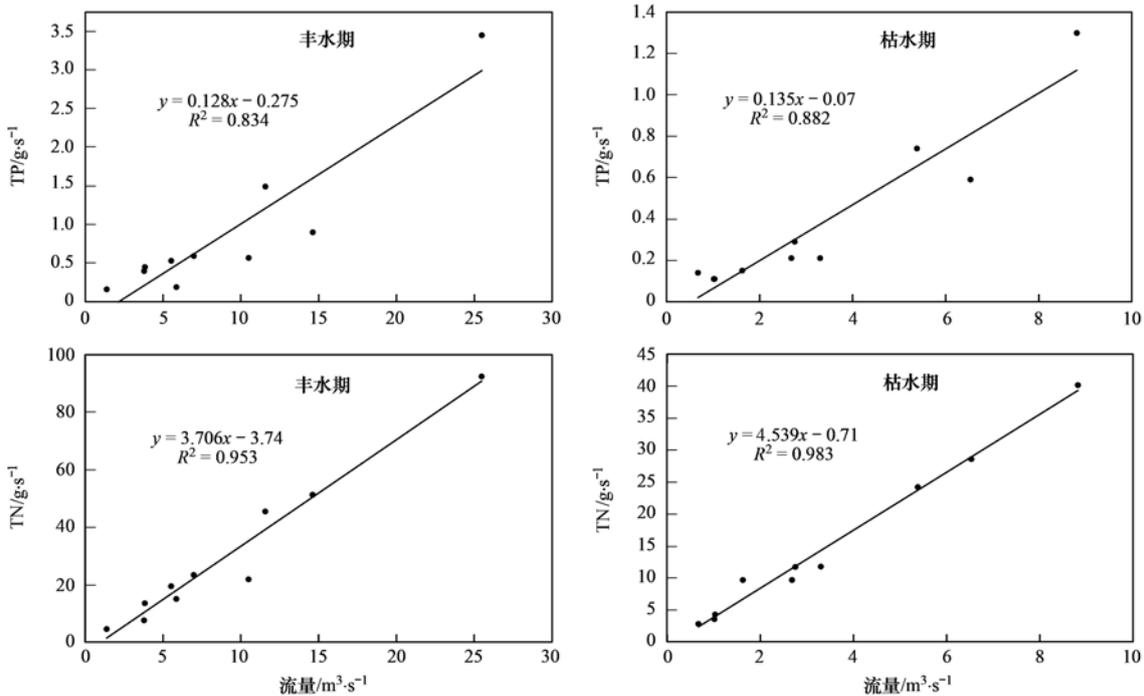


图 3 西苕溪支流 TN、TP 输出量与流量的线性回归图
Fig. 3 Correlation analyses between TN, TP and flow in Xitiaoxi tributaries

51.94%、45.32%、41.54%，COD 负载贡献率为 39.28%，可初步判定该源是以磷和较高 COD 为主的污染源，而区域内畜禽、水产养殖废水的排放符合此特点。分析因子 3 可知，TP、TN 均有较高的负载贡献，其中 NH_4^+ -N 和 PP 也是主要负载形态，而

DO 贡献率很小，表明该污染源有较多的有机物，而生活污水基本符合此特点。对比枯水期的因子组成可知，其基本的载荷贡献组合与次序类似于丰水期因子组成，表明枯水期的污染源组成与丰水期是相同的，只是贡献的份额出现差异。

表 3 西苕溪支流水质参数的主成分分析/%

Table 3 Primary component analysis of aquatic parameters for Xitiaoxi tributaries/%

项目	丰水期			枯水期		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
TN	42.51	21.46	36.02	45.07	24.67	30.26
NH_4^+ -N	38.38	10.08	51.53	52.46	17.44	30.10
NO_3^- -N	55.80	20.34	23.86	44.44	26.90	28.66
TP	17.25	51.94	30.81	11.00	47.20	41.80
PP	15.16	45.32	39.52	16.98	45.40	37.63
TDP	43.51	41.54	14.95	30.01	38.29	31.69
COD	38.32	39.28	22.40	41.52	22.60	35.88
DO	67.81	32.14	0.05	40.39	18.11	41.50
贡献率	40	33	27	35	30	35

2.3.2 不同污染源对支流污染负荷的贡献分析

从图 4 可以看出，丰水期农田径流对 XT01、XT02、XT03 等支流营养物的相对贡献率比较大，分别高达 60.33%、74.11%、54.60%。这 3 条支流均位于安吉县，以耕地（水田、旱地、菜地等）和林地（茶园、果园、桑园等）为主，化肥的使用增加了营养盐的输出^[32]；同时，这些支流区域以山区为主，居民区相对少，养殖污染源和生活污染源相对少。养殖废水在 XT05、XT06、XT07、XT08 支流的营养物贡献率较高，其中对 XT07、XT08 支流的贡献率达到 65% 以上。上述支流主要分布在安吉、长兴的村庄，相对远离城市，水产畜禽养殖业较为集中，饲料和畜禽粪便均增加了营养物的排放，提高了水体中的营养盐^[33,34]，尤其是池塘的高强密度的养殖方

式，更易造成环境污染。一些国外学者对流域的相关研究表明^[35]，含磷物质通常以颗粒态形式进入水体，夏季尤为突出，比例高达 90%；国内学者在研究三峡水库农业面源磷素污染时发现^[4]，输入水体的总磷中颗粒态远远高于其他形态，与本研究污染源解析结果一致。生活污水的排放对 XT04、XT09、XT10 支流营养物的相对贡献率较大，其中对 XT10 支流达到了 45.00%。由于 XT04 支流河口位于安吉县递铺镇，XT09、XT10 支流大多地处湖州市和吴兴区，周围是居民居住区，居民生产生活造成的市政污水大量排放进入水体，增加附近水体营养盐负荷。

枯水期支流的污染源组成稍不同于丰水期，总体上农田径流对上游的支流贡献率下降，养殖废水对中游的支流贡献率下降，而生活污水则对靠近城

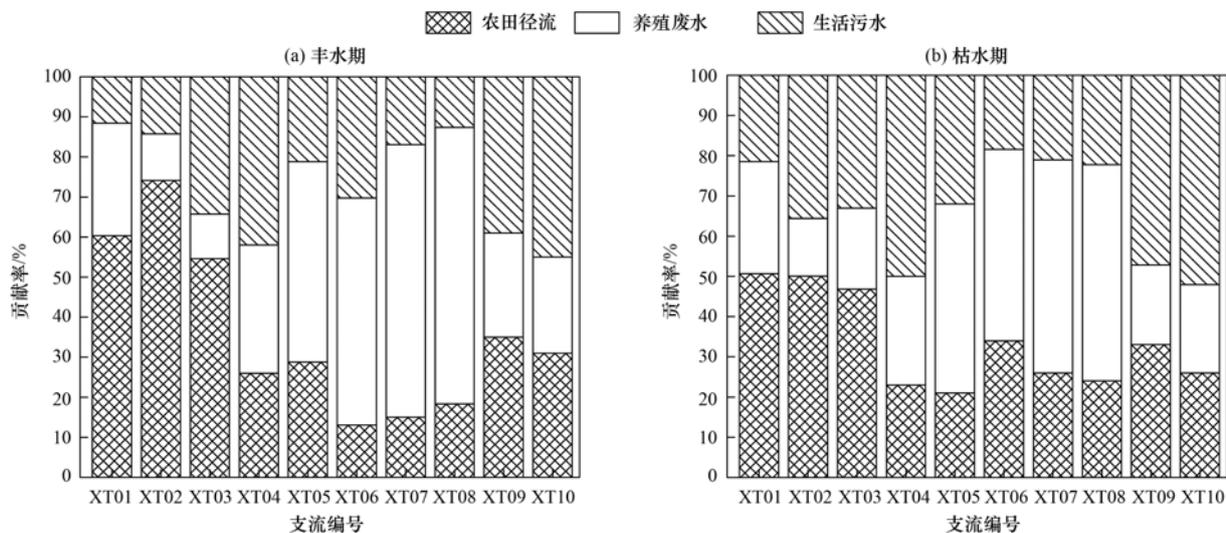


图 4 各污染源对不同支流营养物负荷的贡献率

Fig. 4 Contribution rates of each pollution source to nutrient discharge of different tributaries

市的 XT09、XT10 支流的贡献率上升。通常苕溪流域农林耕作施肥时间多集中于丰水期, 枯水期施肥相对少; 而在枯水期水产畜禽基本属于收获期, 养殖所用饲料产生的污水就大大减少, 减少了营养盐的排放; 生活污染源受季波动影响较小, 排放污染量与丰水期差别不大, 但由于农田径流和养殖废水在枯水期的贡献比例均有所下降, 相应地增加了生活污染源的贡献率。

3 结论

(1) 西苕溪支流水体水质总体良好, 大多数水质指标优于Ⅲ类水质, 但总氮指标明显超标。无论是丰水期还是枯水期, 上游支流的污染相对较轻, 中下游支流的营养盐浓度均升高, 而多数支流在枯水期的营养盐含量高于丰水期。

(2) 不同支流的营养盐形态组分不尽相同, 一方面反映了污染源组成和土地利用的差异, 另一方面也与支流水文条件相关, 因此要减少支流营养盐的输出, 需要结合区域环境与土地利用进行环境保护与治理。

(3) 污染源解析结果表明, 农田径流对西苕溪流域上游支流贡献率较大, 养殖废水主要影响中下游支流, 生活污水对下游段支流贡献最大。农田径流与养殖废水对支流的影响在枯水期时略有减轻, 但生活污水贡献率升高。结合支流的营养状态, 采取有针对性的水质保护措施, 是改善西苕溪流域水质的必要内容。

参考文献:

- [1] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.
Zhu G W. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1): 21-26.
- [2] 赵学敏, 马千里, 姚玲爱, 等. 龙江河水体中氮磷水质风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 233-238.
Zhao X M, Ma Q L, Yao L A, *et al.* Water quality risk assessment based on nitrogen and phosphorus in Longjiang River [J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1): 233-238.
- [3] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1677-1684.
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao river and analysis of potential eutrophication[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1677-1684.
- [4] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 311-315.
Cao C J, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 311-315.
- [5] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. Environmetrics, 1994, 5(2): 111-126.
- [6] Soonthornonda P, Christensen E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater[J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 1989-1998.
- [7] Cao Q M, Wang H, Chen G Z. Source apportionment of pahs using two mathematical models for mangrove sediments in Shantou coastal zone, China[J]. Estuaries and Coasts, 2011, 34(5): 950-960.
- [8] Yang Y H, Wang C Y, Guo H C, *et al.* An integrated SOM-based multivariate approach for spatio-temporal patterns identification and source apportionment of pollution in complex river network[J]. Environmental Pollution, 2012, 168: 71-79.
- [9] 汤智, 廖海清, 张亮, 等. 成渝经济区河流表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2639-2644.
Tang Z, Liao H Q, Zhang L, *et al.* Distribution, source and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediment of Cheng-Yu economic zone[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2639-2644.
- [10] 高伟, 王西琴, 曾勇. 太湖流域西苕溪 1972-2008 年径流量变化趋势与原因分析[J]. 中国农村水利水电, 2010, (6): 33-37.
Gao W, Wang X Q, Zeng Y. A trend analysis of observations of runoff in the Xitiao river in the Taihu lake between 1972 and 2008[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (6): 33-37.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 吴一鸣, 李伟, 余昱葳, 等. 浙江省安吉县西苕溪流域非点源污染负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1976-1985.
Wu Y M, Li W, Yu Y W, *et al.* Non-point source pollution loadings in Xitiao watershed of Anji county, Zhejiang Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1976-1985.
- [13] 金黎明, 张奇, 李恒鹏, 等. 西苕溪流域非点源氮污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1385-1390.
Jin L M, Zhang Q, Li H P, *et al.* Characteristics of non-point source N pollution in Xitiao catchment, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1385-1390.
- [14] 李伟. 苕溪流域地表水水质综合评价与非点源污染模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. 7-178.
Li W. The research on comprehensive evaluation of surface water quality and simulation of non-point source pollution within TiaoXi Watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. 7-178.
- [15] 孙作雷. 苕溪流域农业非点源污染风险评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 1-92.
Sun Z L. Risk assessment for nutrient loss of agricultural non-point pollution source in TiaoXi Watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. 1-92.
- [16] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 48-55.

- Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, *et al.* The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 48-55.
- [17] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 苕溪流域不同施肥条件下稻田田面水氮磷动态特征及产量研究[J]. *土壤*, 2013, **45**(2): 207-213.
Wu J, Fan J B, He Y Q, *et al.* Study on rice yield and dynamics of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field under different fertilizations in Tiaoxi River Basin[J]. *Soils*, 2013, **45**(2): 207-213.
- [18] 刘婷婷. 嘉陵江水体中碳、氮、磷季节变化及其输出[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 6-65.
Liu T T. Seasonal variation and output of C, N, P in Jialing river [D]. Chongqing: Southwest University, 2009. 6-65.
- [19] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 509-517.
Li Z, Guo J S, Fang F, *et al.* Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(4): 509-517.
- [20] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3038-3044.
Lei P, Zhang H, Shan B Q. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3038-3044.
- [21] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [22] 张远, 郑丙辉, 富国, 等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(6): 1016-1021.
Zhang Y, Zheng B H, Fu G, *et al.* On the assessment methodology and standards for nutrition status in channel type reservoirs based on zoning of eutrophication sensitivity[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 1016-1021.
- [23] 张志兵, 施心路, 刘桂杰, 等. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系[J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 2980-2988.
Zhang Z B, Shi X L, Liu G J, *et al.* The relationship between planktonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(6): 2980-2988.
- [24] 刘芸, 易齐涛, 陈求稳, 等. 太湖西部河网中沉积物氮的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3890-3897.
Liu Y, Yi Q T, Chen Q W, *et al.* The spatial distribution of nitrogen species in surface sediment in the west river networks of the Taihu Lake Basin, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3890-3897.
- [25] 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.
Yue W Z, Huang X P. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River Estuary[J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(2): 195-199.
- [26] 姜翠玲, 章亦兵, 范晓秋. 沟渠湿地水体和底泥中有机质时空分布规律研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(6): 618-621.
Jiang C L, Zhang Y B, Fan X Q. Mineralization and accumulation of organic matters in water phase and sediment of ditch wetlands [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004, **32**(6): 618-621.
- [27] 徐兵兵, 卢峰, 黄清辉, 等. 东苕溪水体氮、磷形态分析及其空间差异性[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1181-1188.
Xu B B, Lu F, Huang Q H, *et al.* Forms of nitrogen and phosphorus and their spatial variability in East Tiaoxi River[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1181-1188.
- [28] 苏静君. 加拿大东部农田流域颗粒态磷的输出及藻类有效性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. 1-80.
Su J J. The export and algal availability of sediment-associated phosphorus in agricultural catchments in Eastern Canada [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. 1-80.
- [29] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 377-386.
Li H P, Yang G S, Huang W Y, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus concentration of runoff from different spatial scale watersheds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(4): 377-386.
- [30] 王晓燕, 王静怡, 欧洋, 等. 坡面小区土壤-径流-泥沙中磷素流失特征分析[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(2): 1-5.
Wang X Y, Wang J Y, Ou Y, *et al.* Phosphorus loss from soil-runoff-sediment at slope plots [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(2): 1-5.
- [31] 常闻捷, 边博, 蔡安娟, 等. 太湖重污染区夏季养分输入与流失规律研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(2): 8-13.
Chang W J, Bian B, Cai A J, *et al.* Nutrient inputs and runoff losses during wheat season in highly-contaminated zone of Taihu Lake region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(2): 8-13.
- [32] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1133-1138.
Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different n management methods in Taihu Lake Region [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- [33] 陈家长, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. *农村生态环境*, 2005, **21**(1): 21-23.
Chen J C, Hu G D, Qu J H, *et al.* TN and TP from pond crab farming in the Taihu Valley[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, **21**(1): 21-23.
- [34] 黄欢, 汪小泉, 韦肖杭, 等. 杭嘉湖地区淡水水产养殖污染物排放总量的研究[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(2): 94-97.
Huang H, Wang X Q, Wei X H, *et al.* An research on the quantity of discharged pollutant of freshwater breed aquatics in Hangjiahu area[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(2): 94-97.
- [35] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover[J]. *Water Research*, 2006, **40**(6): 1258-1268.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行