

山区河流氮磷空间分布对人类活动的响应

——以赤水河一级支流桐梓河为例

周晓雯¹, 安艳玲², 吴起鑫¹, 吕婕梅², 高世林¹, 李钊玺¹

(1. 贵州大学 喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州理工学院, 贵阳 550002)

摘要:为了解人类活动影响下的山区河流氮磷分布情况,以赤水河一级支流桐梓河为对象,开展野外调研,对其干流及各条支流进行了水样采集并分析。结果表明:桐梓河总氮、总磷浓度均值分别为 2.85、0.13 mg/L。氮磷浓度的空间差异比较明显,总氮从上游到下游呈波动式增长,总磷则上游高于中下游。总氮有明显的累积效应,从上游源河的 1.34 mg/L,升高到下游河口的 3.40 mg/L,其空间变化主要受上游城镇污水的点源输入、中下游农业面源污染及水利工程等综合影响。而上游城镇外源污染对总磷的输入,使其在桐梓县城段的干流浓度维持在 0.16 mg/L,到下游河口则降低至 0.09 mg/L,说明桐梓河受人为污染输入与水体自净能力的双重作用。桐梓河氮磷比例关系总体表现为磷限制,但上游城镇段河流显示处于潜在富营养区,水质可能受到氮磷污染威胁。

关键词:山区河流; 氮磷; 空间分布; 人类活动

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0179-07

Response of Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus to Human Activities in Mountainous Rivers

—A Case Study of Tongzi River, a First-grade Tributary of Chishui River

ZHOU Xiaowen¹, AN Yanling², WU Qixin¹, LÜ Jiemei², GAO Shilin¹, LI Fanxi¹

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to understand the distribution of nitrogen and phosphorus in mountainous rivers under the influence of human activities, the Tongzi River, the first tributary of Chishui River, was taken as the object to carry out field investigation, and water samples of its main stream and various tributaries were collected and analyzed. The results show that the average concentrations of total nitrogen, total phosphorus are 2.85 mg/L and 0.13 mg/L, respectively; the spatial difference of nitrogen and phosphorus concentrations is obvious; total nitrogen fluctuates from upstream to downstream, while total phosphorus is higher in the upstream than in the downstream; total nitrogen has a significant cumulative effect, from 1.34 mg/L in the upstream source river to 3.40 mg/L in the downstream estuary, and its spatial change is mainly affected by the point source input of the upstream urban sewage, the agricultural non-point source pollution in the middle and lower reaches and the water conservancy project; the input of total phosphorus from external sources of pollution in the upper reaches of the town kept the main stream concentration of Tongzi County at 0.16 mg/L, and it decreased to 0.09 mg/L at the downstream estuary, indicating the dual role of human pollution input and water self-purification ability in Tongzi River. The overall ratio of nitrogen to phosphorus in the Tongzi River is restricted by phosphorus, but it is shown that the upstream urban section of the river is in a potentially eutrophic area, and the water quality may be threatened by nitrogen and phosphorus pollution.

Keywords: mountain river; nitrogen and phosphorus; spatial distribution; human activities

收稿日期: 2020-09-06

修回日期: 2020-10-03

资助项目: 贵州理工学院高层次人才科研启动经费项目(2019[45]); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2018]20101); 贵州省水利厅科技资助项目(KT201508); 国家自然科学基金(41603123, 41763019, 41501018); 国家自然科学基金委—贵州省喀斯特联合资助项目(U1612442); 贵州省科技厅联合资助项目(黔科合 LH 字[2016]7457 号); 贵州一流学科建设(GNYL[2017]007)

第一作者: 周晓雯(1995—), 女, 重庆渝中人, 硕士研究生, 研究方向为流域水环境。E-mail: 416622493@qq.com

通信作者: 安艳玲(1975—), 女, 内蒙古通辽人, 教授, 博士, 主要从事流域管理研究。E-mail: 20170792@git.edu.cn

氮、磷营养盐的大量输入易使水体的营养水平失去平衡,进而破坏河流或湖泊水质,导致浮游植物大量生长,引起一系列富营养化、水体缺氧等环境问题^[1-4],因此关注河流水体氮磷水平对水环境管理起到关键作用。长期以来,国内外学者对水体中氮磷特征及影响因素开展了广泛研究,有研究表明,地形地貌^[5]、水文气象等^[6]自然因素对河流氮磷分布具有一定作用,而各类污染源排放^[7]、建坝蓄水^[8]、改变用地类型等^[9]人为因素影响更为强烈;在不同的影响因素下水体的氮磷浓度及形态变化具有显著差异^[10-11]。

氮、磷营养盐进入水体的途径广泛、形式多样,包括点源污染和面源污染。我国学者分别对重庆主城区次级河流^[12]、天津中心城区河网^[13]、成都市区主要河流府南河等^[14]典型城市河流水体氮、磷综合污染特征进行研究,研究结果显示未完全收集或处理的城镇生活污水和工矿企业废水等点源污染的集中排放,将使受纳水体氮磷达到高浓度水平;Wu等^[15]对东江流域的研究发现农业面源污染将氮磷污染物以分散、广泛、微量的方式进入河流,导致水体的氮磷空间分布存在差异性。近年来随着我国城乡统筹发展战略的实施,将城市农村紧密结合,流域进入“城镇—农业”复合发展阶段,人类活动更为频繁,特别是山区河流在人为干扰下,其污染系统更复杂,污染过程带有点面结合的特征,在外源氮磷污染的强烈输入及持续的营养压力下,一旦超过山区河流的自净能力,将对水体的氮磷含量造成难以控制的累积影响,使山区河流生态系统健康状况受到威胁。过往研究成果集中在某城市或农业氮磷污染严重河段,对具有双重特征的山区河流氮磷营养水平关注较少。因此了解山区河流的氮磷营养盐分布状况、来源及影响因素对保护其水生态系统、防治水质恶化均具有重要意义。

桐梓河位于黔北遵义市,是赤水河最大支流,其氮磷输出对赤水河水水质贡献较大。桐梓河所在区域属于典型的喀斯特山区流域,其独特的地形地貌和水文二元结构^[16-17],造成其水环境十分脆弱,河流对人类活动产生的生态系统变化敏感,而目前傍河城镇的城市化进程加快、农业活动扩展,加重了流域内部的水土流失,其土地利用类型也随之发生显著改变,直接影响着桐梓河水体的营养水平,但是目前针对该河流的氮磷空间分布对人类活动的响应机制尚未见报道。

鉴于此,本研究以桐梓河为研究对象,通过对河流样品现场收集和试验测定,分析桐梓河水体氮磷空间分布特征,从水体环境因子及人类活动对氮磷作用的角度,探讨影响桐梓河氮磷分布的主要因素,为桐梓河及赤水河流域水环境保护策略制定提供科学依据。

1 研究区概况

桐梓河,赤水河中段一级支流,发源于遵义市桐梓县小坝乡楚米镇,位于东经 $106^{\circ}12'$ — $106^{\circ}53'$,北纬 $27^{\circ}52'$ — $28^{\circ}11'$,流域面积 $3\,348\text{ km}^2$,河流全长 125 km ,自西向东流经桐梓、汇川、仁怀、习水4县(市、区)部分乡镇,于仁怀、习水交界之两河口汇入赤水河。

桐梓河处于亚热带季风性湿润气候区,年平均气温 17.7°C ,年平均降水量 $850\sim 1\,200\text{ mm}$,雨量较丰沛但分布不均,5—8月为雨季,占总降水量的60%;径流的时空分布变化与降水基本一致,属于典型的山区雨源型河流。流域内崇山峻岭,多悬岩崩石,除发源地天门属冲积盆地,其余地区呈典型喀斯特山地特点^[18],耕地分散,河谷纵深。

桐梓河上游区域地势较平坦,城镇建设用地密集,人口密度大,且污水收集处理系统尚不完善,存在局部点源污染,中下游流经坡度较陡、地势较高的喀斯特山区,以林地、耕地为主,坡地垦殖率高,在降雨的冲刷下坡耕地更易向水体输入农业面源污染,特别是下游水体附近分散有部分农村居民聚居点,畜禽养殖以家庭式散养为主,其产生的非点源污染的氮磷浓度高且难以控制去向^[19]。流域内农业人口较多,同时发展有小型采煤、铁合金冶炼、机械、电力、轻手工业等。桐梓河的水利资源也在加快开发,现建有圆满贯水电站、杨家园水电站等8级水电站及20余座中小型水库。

2 样品采集及分析

2019年8月对桐梓河沿途干流、主要支流进行样品采集,根据河流水文特征及周围用地类型,共设置31个采样点:干流上游河源至桐梓县燎原镇段(G_1-G_5)、中游桐梓与汇川界河(G_6-G_9)、下游仁怀与习水界河($G_{10}-G_{13}$)及各条支流包括上游桐梓县城内漆溪河等分支(S_1-S_4)、中游高桥镇段(Z_1)、混子河(H_1-H_5)、观音寺河(Y_1-Y_5)、下游沙溪河(X_1)、马鹿河(X_2)、二郎河(X_3)(图1)。使用哈希 Hydro-lab 多参数水质分析仪现场测定原位表层水体的pH值(精度为 ± 0.2 个单位)、水温(精度为 $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$)、溶解氧(精度为 $\pm 0.2\text{ mg/L}$)、电导率(精度为读数的 $\pm 1\%$)、浊度(精度为读数的 $\pm 1\%$)。采集的水样测试前冷藏于 4°C 的冰箱中。

原水用于测试总氮(TN)、总磷(TP);取适量原水经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维过滤膜过滤后,滤液用作氨氮(NH_4^+-N)、溶解态磷(DTP)的测定。TN采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法(GB11894—89), NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法(GB7479—87),TP和

DTP 采用钼锑抗分光光度法(GB11893—89)。每 5 个样品任意取 1 个测定平行样,误差范围控制在±5%。颗粒态磷(PP)用质量差减法求得:PP=TP—DTP。

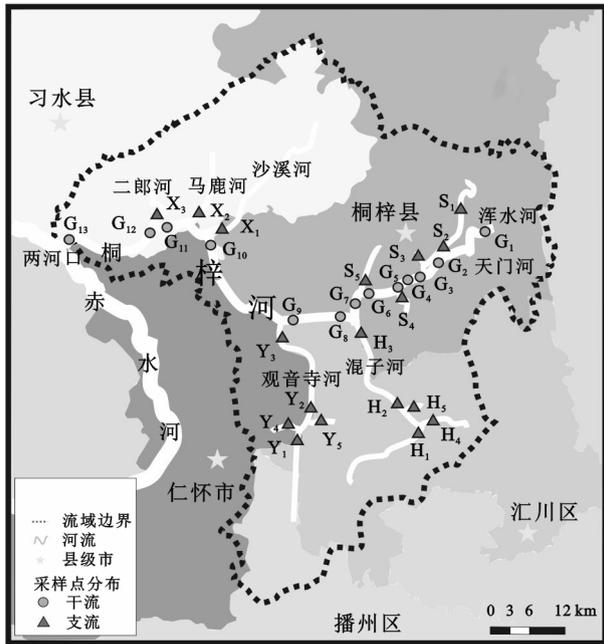


图 1 桐梓河采样点分布示意

3 结果与分析

3.1 桐梓河水体理化指标

桐梓河水体 pH 值相对稳定,均值为 9.13(表 1),偏弱碱性。DO 浓度整体偏高,均值为 8.91 mg/L,河流处于富氧状态,水体较清洁。EC 平均为 435.95 $\mu\text{S}/\text{cm}$,通常饮用水 $\text{EC} < 300 \mu\text{S}/\text{cm}$,表明水体受到人为因素的影响。浊度变异系数达到 113.88%,具有明显的空间差异,下游水体透明度相对较高,河流底质以自然形成的岩石颗粒为主,浊度值因此较低。

表 1 桐梓河的水体理化指标

| 水质指标 | 范围 | 均值 | 标准偏差 | 变异系数/% |
|--|---------------|--------|-------|--------|
| TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 1.34~9.45 | 2.85 | 1.41 | 49.43 |
| $\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 0.01~2.65 | 0.25 | 0.46 | 186.19 |
| TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 0.04~0.48 | 0.13 | 0.10 | 75.54 |
| DTP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 0~0.18 | 0.02 | 0.03 | 198.47 |
| PP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 0.04~0.46 | 0.11 | 0.08 | 73.41 |
| 水温/ $^{\circ}\text{C}$ | 19.98~28.97 | 23.58 | 2.91 | 12.34 |
| pH 值 | 8.54~9.34 | 9.13 | 0.17 | 1.81 |
| DO/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 1.24~13.01 | 8.91 | 2.37 | 26.62 |
| EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) | 330.00~622.30 | 435.95 | 61.14 | 14.03 |
| 浊度(NTU) | 0~78 | 19.69 | 22.42 | 113.88 |

TN 浓度水平较高,平均为 2.85 mg/L,为国家 V 类水水质标准的 1.4 倍,而 NH_4^+-N (均值 0.25 mg/L)符合 II 类水水质标准;TP 浓度平均为 0.13 mg/L,符合 III 类水水质标准,DTP,PP 均值分别为 0.02,0.11 mg/L。

从水质指标的变异系数看, NH_4^+-N ,DTP 均高于 100%,存在空间异质性。

3.2 桐梓河氮、磷浓度分布特征

3.2.1 干流氮、磷空间分布 干流氮磷浓度空间变化规律见图 2—3。干流 TN 浓度平均为 2.52 mg/L,从上游河源至下游河口呈波动式增长,浓度为 1.34~3.44 mg/L; NH_4^+-N 浓度均值为 0.17 mg/L,浓度沿程波动较小,但 NH_4^+-N 浓度的最高点(0.54 mg/L)出现在上游桐梓县中心城区,周围人类活动频繁。而 TP 浓度变化范围为 0.06~0.16 mg/L(均值为 0.12 mg/L),上游整体高于中下游,PP 的趋势跟 TP 基本一致,山区水体的自净作用及中下游布设的水利工程对磷素作用较显著;DTP 浓度下游变化较大, G_{12} 点浓度最高(0.06 mg/L),推测与下游傍河村镇有关。

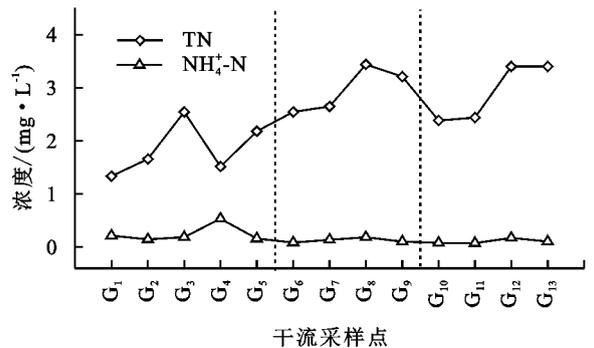


图 2 桐梓河干流采样点水体的 TN 和 NH_4^+-N 浓度

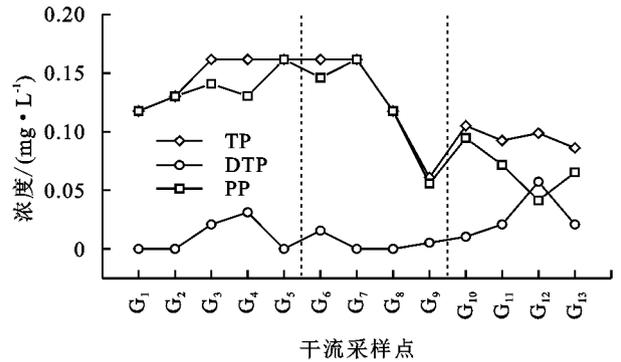


图 3 桐梓河干流采样点水体的 TP, DTP 和 PP 浓度

3.2.2 支流氮、磷空间分布 各条支流氮磷浓度空间变化规律如图 4—5 所示。上游重要支流漆溪河(S_3)处于城镇建设用地密集区,其 TN,TP 浓度分别达到 9.45,0.44 mg/L,均超过地表水 V 类水质浓度限值,也高于桐梓河平均值,水体污染较重,影响到本段干流氮磷变化。中游主要支流所在山区水土流失情况严重,混子河(H_1-H_5)PP 均值为 0.06 mg/L,占 TP 的 95.78%,而大部分采样点未检出 DTP;观音寺河(Y_1-Y_5)周围农业活动更频繁,其 TN 高于混子河(2.48 mg/L),均值为 3.18 mg/L,而 NH_4^+-N 低于混子河(0.24 mg/L),只有 0.10 mg/L。下游各条支流 TN,TP 浓度

均呈阶梯状增长,离河口最近的二郎河(X_3)流经农

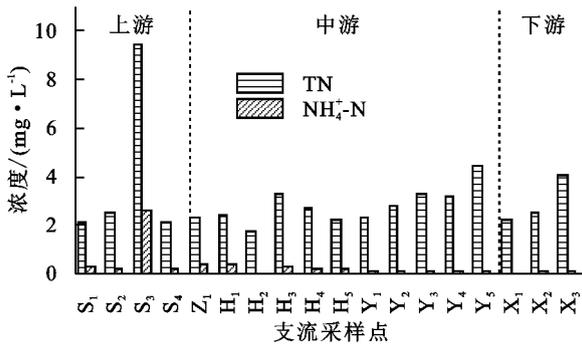


图 4 桐梓河各条支流采样点水体的 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

3.3 桐梓河氮、磷浓度空间差异影响因素分析

3.3.1 理化环境因子与氮、磷变化的相关性 利用 SPSS 25.0 软件对氮磷和 pH 值、水温、DO、EC、浊度这 5 个环境因子质量参数之间进行 Pearson 相关系数及其双尾显著性分析。从表 2 得知, TN 与 TP 呈显著正相关($R=0.43, p<0.05$), 该结果与徐兵兵等^[20]在

表 2 桐梓河氮、磷与其他理化因子之间的相关系数

| 指标 | TN | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | TP | DTP | PP | TN/TP | 水温 | pH 值 | DO | EC | 浊度 |
|--------------------------|---------|--------------------------|---------|---------|---------|-------|-------|--------|-------|------|----|
| TN | 1 | | | | | | | | | | |
| $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | 0.80** | 1 | | | | | | | | | |
| TP | 0.43* | 0.62** | 1 | | | | | | | | |
| DTP | 0.83** | 0.90** | 0.59** | 1 | | | | | | | |
| PP | 0.17 | 0.36* | 0.94** | 0.29 | 1 | | | | | | |
| TN/TP | 0.21 | -0.15 | -0.58** | -0.11 | -0.64** | 1 | | | | | |
| 水温 | 0 | -0.06 | -0.03 | -0.01 | -0.03 | -0.05 | 1 | | | | |
| pH 值 | -0.55** | -0.68** | -0.52** | -0.62** | -0.36* | 0.16 | 0.29 | 1 | | | |
| DO | -0.38* | -0.35 | -0.23 | -0.48** | -0.08 | 0.09 | 0.39* | 0.50** | 1 | | |
| EC | 0.67** | 0.57** | 0.58** | 0.56** | 0.46** | -0.08 | -0.17 | -0.45* | -0.31 | 1 | |
| 浊度 | 0.07 | 0.12 | 0.28 | 0.07 | 0.30 | -0.29 | -0.07 | -0.41* | 0.06 | 0.23 | 1 |

注: ** 代表在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; * 代表在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

pH 值与各种形态的氮磷均呈负相关关系, 其中与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 存在相关系数较高的极显著关系($R=-0.68, p<0.01$), 表明水体的酸碱度会影响氮素的赋存形态。EC 与各种形态的氮磷都存在极显著正相关($p<0.01$), EC 是综合反映水体含盐量的指标, 它与氮磷良好的相关关系可以说明人类活动产生的溶解性盐类对水体氮、磷浓度及组成有显著影响。DO 与 TN 有负相关关系($R=-0.38, p<0.05$), 夏云等^[10]研究表明, DO 能影响氮素不同形态的相互转化。研究期间桐梓河大部分采样点的 DO 浓度超过 8 mg/L, 某些采样断面可能因水藻繁生等因素使 DO 处于饱和状态, 水体出现氧化性氛围, 硝化作用积极发生, 造成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相对减少。

3.3.2 人类活动对氮、磷变化的影响

(1) 城镇生活污染及工业生产的影响。桐梓河

村居民点及小型养殖场, TN 达 4.07 mg/L。

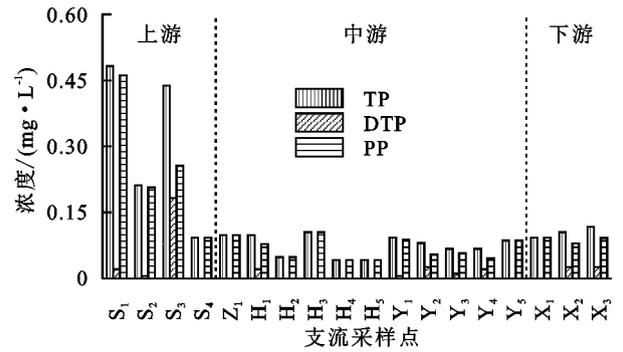


图 5 桐梓河各条支流采样点水体的 TP、DTP 和 PP 浓度

东茗溪水体的研究结果一致, 说明桐梓河流域具备农业面源污染特征, 氮、磷进入桐梓河的形式及途径大致相同, 农业面源污染向水体输入大量氮、磷。TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 以及 TP 与 PP 呈极显著正相关($R=0.80, p<0.01; R=0.94, p<0.01$), 表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 PP 是桐梓河水体中氮、磷的重要赋存形态。

上游与中下游相比, 源头河段受排入的城镇生活污水及工业废水等点源污染影响更显著, 造成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度空间差异较大, 上游远高于中下游。桐梓河上游流经桐梓县城中心区域, 这些区域人口密度大, 每日有大量生活污水产生, 而且该区域支流数量较多、覆盖较广, 特别是穿城支流漆溪河(S_3) 靠近商业交通居民混合区, 人口更加密集, 两岸也分布有桐梓重庆工业园等规模化工业园区, 地表水易受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 重度污染, S_3 点 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高达 2.65 mg/L, 对 TN 贡献为 28.03%, 这与董雯等^[21]发现高浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为城市重污染河流皂河的水质特征的研究结果一致。

上游 TP 也显著高于中下游, 位于桐梓县城的各条支流均值为 0.38 mg/L, 同样高永霞等^[22]发现在环太湖不同性质河流中, 受生活污水影响河流水体的 TP 浓度最高。桐梓河中下游处于山区, 相对远离城

镇,建设用地减少,植被覆盖率提高,高度集中的工业活动和居民污染源较少,并且通过植物截留、微生物分解以及沉积物吸附等自然净化机制对山区水体起到一定程度的自净效果,因此中下游 TP 浓度降低至 0.09 mg/L。孙丽梅等^[23]在城郊樟溪流域的研究表明,氮磷浓度与距城镇距离呈显著负相关关系,说明城镇化水平对流域氮、磷污染具有重要影响。

(2) 农业生产活动的影响。中下游流域呈典型喀斯特地貌,存在石漠化风险,易发生水土流失^[24-25],水体附近土地利用类型多为坡耕地,秦立^[26]通过相关性分析发现,赤水河流域内的耕地对硝态氮(NO_3^- -N)输出均表现为显著的“氮源”作用,农田氮流失以 NO_3^- -N 为主, NH_4^+ -N 则易被土壤颗粒吸附和植物根系吸收,不易从土壤淋失进入河流^[27]。因此桐梓河受污染段河流表现出 NH_4^+ -N 占 TN 比重呈下降趋势,其中中游主要支流观音寺河的 TN 浓度较高,最高点 Y_5 达到 4.45 mg/L,但 NH_4^+ -N 浓度仅为 0.10 mg/L,仅为 TN 的 3.24%。中游 TN 浓度呈逐渐上升趋势,主要与农田面源污染有关,而 NH_4^+ -N 的贡献相对较少,仅占 TN 的比例为 6.26%。PP 总体约占 TP 的 87.30%,PP 为桐梓河水体中 TP 的主要存在形式,这是由于在农业生产活动中,氮肥、磷肥只有少量被作物吸收,而大部分营养元素则随降雨进入桐梓河水体以及水土流失过程中土壤养分和有机质随泥沙一起被带入水环境^[28]。

下游主要支流分布在二郎镇等傍河村镇,其畜禽养殖业较为集中,饲料、畜禽粪便及散乱排放的农村生活污水增加了营养盐的排放,提高了水体中 TN 浓度,比如二郎河(X_3)的 TN 浓度达到 4.07 mg/L,下游段干流 TN 也受到支流汇入的影响,保持较高水平,均值为 2.91 mg/L。同时区域内畜禽养殖废水的输入使水体中 DTP 浓度得到增长,DTP 对 TP 的占比随之上升,尤其是 G_{12} 的 DTP 浓度达到 0.06 mg/L,占 TP 的 58.02%,对 TP 的贡献提高。

(3) 水利工程的影响。桐梓河流域并未禁止水电开发项目,从桐梓河上游到下游建有多级水电站及其他中小型水库,河道上拦截筑坝容易引起桐梓河这类山区河流的氮磷输送状况的改变。圆满贯水电站采样点(G_8)的 TN 浓度与流经前(G_7)相比,提升了 30%,达到 3.44 mg/L,杨凡等^[29]在三峡库区的研究表明,水利工程可以使河道水位上升,流速减缓,水力连通性降低,造成氮磷水域局部积累;水电站下游(G_9)的 TN,TP 浓度分别下降至 3.21,0.06 mg/L,卢龙等^[30]在研究赣江时发现,水利枢纽有一定的净化作用,水力停留时间延长导致期间发生的生物化学作

用有利于 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N,而磷素易发生吸附作用,以颗粒态的形式沉降于河底,其下游输出水体的氮磷浓度随之降低。

3.3.3 氮、磷空间分布对人类活动的响应 桐梓河水体 TN,TP 平均浓度(2.85,0.13 mg/L)超过位于青藏高原的长江源和怒江源区河流^[31](0.64,0.01 mg/L)及以林地为主的太子河上游^[32](1.65,0.03 mg/L)等受人类活动影响较小的自然水体,低于典型城镇河流小浹江^[33](6.17,0.20 mg/L)、农业活动剧烈的脱甲河^[34](4.84,0.17 mg/L)(表 3)等重污染河流。就桐梓河氮素浓度水平来说,与清水江^[35]、三岔河^[36]、麦西河等^[37]贵州大部分河流 TN 浓度(2.36,1.62,2.79 mg/L)较高的特点一致,且高于赤水河各条支流^[26]TN(2.69 mg/L)、 NH_4^+ -N(0.06 mg/L)浓度的平均值,表明桐梓河的氮素输出会对赤水河造成一定影响。

表 3 国内地表水中氮、磷平均浓度对比 mg/L

| 河流 | 均值 | | |
|--------------------------|------|--------------------|------|
| | TN | NH_4^+ -N | TP |
| 桐梓河(本研究) | 2.85 | 0.25 | 0.13 |
| 长江源和怒江源区 ^[31] | 0.64 | 0.11 | 0.01 |
| 太子河上游 ^[32] | 1.65 | 0.19 | 0.03 |
| 小浹江 ^[33] | 6.17 | 0.72 | 0.20 |
| 脱甲河 ^[34] | 4.84 | 2.83 | 0.17 |
| 清水江 ^[35] | 2.36 | 0.53 | 1.08 |
| 三岔河 ^[36] | 1.62 | 0.39 | 0.08 |
| 麦西河 ^[37] | 2.79 | 0.82 | 0.10 |
| 赤水河支流 ^[26] | 2.69 | 0.06 | |

与同为山区河流但处于非喀斯特地区的黑水滩河^[38]进行比较,黑水滩河受河流两岸形成串联状的多级城镇污染的持续压力,最终在河口处达到氮磷浓度的峰值,而桐梓河位于贵州高原喀斯特山区,地表崎岖破碎,不易形成连续分布的城镇居民区,仅在上游段承受来自桐梓县城较集中的城镇污染,TP 浓度因此出现峰值,到下游河口处略有降低,说明河流仍具有一定的自净能力。

与典型的城市或农业河流不同的是,桐梓河具有“点一面”污染复合特征,上游主要输出城镇点源污染,中下游喀斯特流域土层浅薄、生态环境脆弱,水体对人为干扰影响更敏感,农业生产活动的加强、土地利用方式的改变,以及水利工程的闸坝拦截,都导致桐梓河经受人为干扰,特别是喀斯特山区夏季多雨,水土流失加重面源污染,营养元素流失的面积更加广泛。因此,河流承受从上游到下游点面污染结合的双重影响,造成 TN 浓度在变化波动中逐渐积累。

3.4 桐梓河水体主控因子分析

水体中的氮磷比[m(TN) : m(TP),质量比]反映氮磷对浮游植物生长的营养限制。当 TN/TP ≥ 22.6 时,表现为磷缺乏;当 TN/TP ≤ 9 时,表现为氮缺乏;当 TN/TP 介于两者时,表明氮磷均可能是主要限制因子,此时浮游植物生长与氮、磷浓度存在线性相关关系,环境适合藻类生长,易造成水体富营养化^[39-40]。

桐梓河水体的 TN/TP 实际介于 4.47~63.33,有 3.2% 为氮限制,67.7% 为磷限制,其余均处在两者之间;TN/TP 平均值为 28.47,与受含磷废水污染而暴发过水华的香溪河^[40] 比较,桐梓河 TN/TP 较高,总体处于磷限制状态。与平原河流^[13] 相比,山区河流流速快,坡降大,交换能力强,所以桐梓河尚未出现大规模的水华现象,但上游大部分采样点的 TN/TP 为 10~25(图 6—7),上游水体整体处于潜在富营养化区,一旦有流速缓慢的河段,有发生水华的高风险,特别是位于城镇段河流,高浓度的外源点源输入可能造成水质恶化。中游水体 TN/TP 较高,支流混子河和观音寺河 TN/TP 均值分别为 41.71,41.24,下游略低于中游,是由于 TP 浓度相对升高,与傍河城镇的村镇生活污水及畜禽废水等面源污染有关。总之,人类活动主导的流域土地利用方式的改变,使桐梓河受到“点一面”结合的污染,对水体 TN/TP 影响显著,令桐梓河水体氮磷组成多样化,进一步增加河流

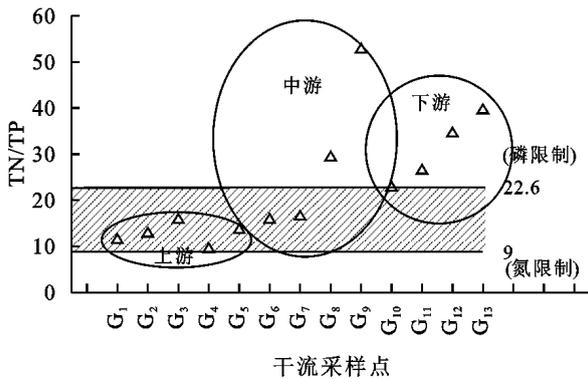


图 6 桐梓河干流各采样位点水体的氮磷比

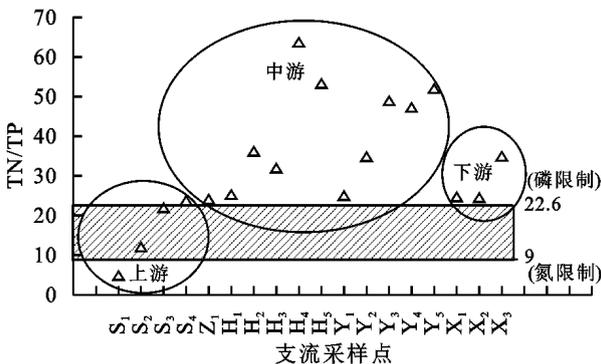


图 7 桐梓河各条支流各采样位点水体的氮磷比

4 结论

(1) 桐梓河 TN 浓度偏高,均值为 2.85 mg/L,符合贵州河流氮素特征,TP 浓度均值为 0.13 mg/L,赋存形态以 PP 为主。在空间上,TN 浓度呈波动式增长,TP 浓度则上游高于中下游。

(2) 人类活动带来的“城镇—农业”点面污染使河流的氮磷浓度表现出显著的空间分布特征。上游水体中高浓度的 TP 主要受工业废水、城镇生活污水等点源污染的影响;中下游 TN 浓度的积累主要是由于化肥施用、畜禽养殖等农业生产活动及农村生活污水带来的非点源污染;干流上的水利工程也对水体中的氮磷有一定滞留或净化作用。

(3) 桐梓河氮磷比平均为 28.47,处于磷限制状态,暂无大规模水华现象发生,主要因为山地河流流速较快,不利于藻类的生长繁殖。但氮磷比显示上游河流整体处于潜在富营养化区,城镇高浓度氮磷污染输入水体,对上游水质有严重威胁。

参考文献:

[1] Wang J L, Fu Z S, Qiao H X, et al. Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(P1):1392-1402.

[2] Hobbie S E, Finlay J C, Janke B D, et al. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences[J], 2017, 114(16):4177-4182.

[3] Liu C, Zhong J C, Wang J J, et al. Fifteen-year study of environmental dredging effect on variation of nitrogen and phosphorus exchange across the sediment-water interface of an urban lake[J]. Environmental Pollution, 2016, 219:639-648.

[4] Richard B A, Richard A S, Gregory E S, et al. Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(3):822-830.

[5] Zhang B Y, Ding W, Xu B, et al. Spatial characteristics of total phosphorus loads from different sources in the Lancang River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, 722. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137863.

[6] 张林,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J].环境科学,2018,39(2):792-799.

[7] 孟凡非,杨成,彭艳,等.阿哈水库枯水期入库河流可溶性氮、磷含量分布特征[J].地球与环境,2020,48(5):612-621.

- [8] 周涛,程天雨,虞宁晓,等.乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应[J].生态学杂志,2018,37(3):707-713.
- [9] Li C W, Zhang H Y, Hao Y H, et al. Characterizing the heterogeneous correlations between the landscape patterns and seasonal variations of total nitrogen and total phosphorus in a peri-urban watershed[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27:1-11.
- [10] 夏云,张波涛,姜德娟.大沽河溶解态无机氮时空分布特征及来源探讨[J].农业环境科学学报,2020,39(1):182-190.
- [11] Brian E L, Laura W H, Rachel A B. Nutrient over-enrichment and light limitation of seagrass communities in the Indian River Lagoon, an urbanized subtropical estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134068.
- [12] 庆旭瑶,任玉芬,吕志强,等.重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价[J].环境科学,2015,36(7):2446-2452.
- [13] 郑剑锋,焦继东,孙力平,等.天津中心城区河网氮磷污染与富营养化特征[J].湖泊科学,2018,30(2):326-335.
- [14] 吴怡,郭亚飞,曹旭,等.成都府南河叶绿素 a 和氮、磷的分布特征与富营养化研究[J].中国环境监测,2013,29(4):43-49.
- [15] Wu Y P, Chen J. Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China[J]. *Ecological Indicators*, 2013,32(9):294-304.
- [16] Jarvie H P, Sharpley A N, Brahana V, et al. Phosphorus retention and remobilization along hydrological pathways in karst terrain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(9):4860-4868.
- [17] Zhu J, Li S L, Wang Y C, et al. Spatial characters of nutrients in Wujiangdu Reservoir in karst river, SW China[J]. *Acta Geochimica*, 2017,36(4):605-610.
- [18] 田义超,王世杰,白晓永,等.桐梓河流域输沙量变化及其对气候和人类活动的响应[J].自然资源学报,2019,34(12):2701-2716.
- [19] 田义超,黄远林,白晓永,等.基于二元逻辑斯蒂模型的桐梓河流域土地利用变化及模拟[J].科学技术与工程,2019,19(6):50-62.
- [20] 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.
- [21] 董雯,李怀恩,李家科,等.城市重污染河流水质特征分析:以皂河为例[J].水力发电学报,2012,31(4):72-77.
- [22] 高永霞,宋玉芝,于江华,等.环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征[J].环境科学,2016,37(4):1404-1412.
- [23] 孙丽梅,裴钱玲琳,杨磊,等.长三角城郊樟溪流域水体氮磷分布特征及其影响因素[J].生态毒理学报,2018,13(4):30-37.
- [24] 邹翔,薛小红,赵健.赤水河流域水土流失特点与分区防治研究[J].长江科学院院报,2010,27(8):12-15.
- [25] 梁启忠.遵义市汇川区石漠化治理研究[J].绿色科技,2011(6):35-37.
- [26] 秦立.基于不同土地利用下水土流失对赤水河流域氮素输出的影响研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [27] Schwarz, M T, Oelmann Y, Wilcke W. Stable N isotope composition of nitrate reflects N transformations during the passage of water through a montane rain forest in Ecuador[J]. *Biogeochemistry*, 2010,102(1/3):195-208.
- [28] 张为,杨斌.赤水河干流水环境影响因素分析[J].安徽农业科学,2019,47(5):80-83.
- [29] 杨凡,杨正健,纪道斌,等.三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素 a 和营养盐的空间分布特征[J].环境科学,2019,40(11):4944-4952.
- [30] 卢龙,谢芳立.赣江水体氮磷营养盐分布特征及影响因素[J].南昌大学学报:理科版,2017,41(6):567-571.
- [31] 叶玉适,陈进,许继军,等.长江源和怒江源区水体氮磷化学计量特征初探[J].长江科学院院报,2019,36(9):6-11.
- [32] 王琼,卢聪,范志平,等.辽河流域太子河流域 N, P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化[J].湖泊科学,2017,29(2):297-307.
- [33] 高凤,邵美玲,曹昌丽,等.城镇化流域氮、磷污染特征及影响因素:以宁波北仑区小浞江为例[J].湖泊科学,2019,31(3):689-699.
- [34] 宋立芳,王毅,吴金水,等.水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J].环境科学,2014,35(1):150-156.
- [35] 黄娟,安艳玲,吴起鑫.清水江流域水体中氮磷分布及富营养化程度评价[J].环境工程,2016,34(5):143-147.
- [36] 吴旌滔.贵州三岔河流域水质时空分布特征及影响因素分析[D].贵阳:贵州大学,2016.
- [37] 冯源嵩,林陶,杨庆媛.百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征[J].环境科学,2014,35(12):4537-4543.
- [38] 龚小杰,王晓锋,刘婷婷,等.流域场镇发展下三峡水库典型入库河流水体碳、氮、磷时空特征及富营养化评价[J].湖泊科学,2020,32(1):111-123.
- [39] 白文辉,王晓昌,王楠,等.北方高盐景观水体氮磷时空分布特征及富营养化评价[J].环境工程,2017,35(4):120-124.
- [40] Zhang Y, Song C L, Ji L, et al. Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627:1294-1302.