

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.020.

侯文宁, 王海燕, 孟海, 等. 筭溪河面源污染及其与河岸带土壤有机碳、氮、磷的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 117-125.

Hou Wenning, Wang Haiyan, Meng Hai, et al. Nonpoint Source Pollution and Its Relationship with Soil Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus of the Riparian Zone in the Sunxi River Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 117-125.

筭溪河面源污染及其与河岸带土壤有机碳、氮、磷的关系

侯文宁, 王海燕, 孟海, 宁一泓, 赵晗, 崔雪

(北京林业大学 林学院/森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 分析水体和河岸带土壤氮磷的空间异质性, 探讨河岸带土壤有机碳、氮、磷含量对水体面源污染的影响程度, 为明晰重庆筭溪河水体面源污染状况及其与河岸带土壤的关系提供理论依据。 [方法] 沿筭溪河采集水样 44 个、0—20 与 20—40 cm 土层土样各 44 个, 采用内梅罗指数评价了筭溪河水质污染状况, 并运用方差分析和多重比较、独立样本 t 检验、相关性分析和冗余分析等方法研究了河岸带水体不同形态氮、磷, 土壤有机碳与氮、磷总量和有效量的空间分布特征, 以及水体氮、磷对土壤有机碳与各形态氮、磷及化学计量比的响应。 [结果] (1) 筭溪河水体严重污染, 且下游污染较上、中游严重; (2) 筭溪河下游水体总氮、总磷和可溶性磷酸盐极显著高于上、中游, 下游硝酸盐氮极显著高于中游 ($p < 0.01$); (3) 下游 20—40 cm 土层土壤有机碳含量显著高于中游, 两个土层土壤有效磷和 20—40 cm 全磷在各河段间差异显著, 而 20—40 cm C/P 和 0—40 cm N/P 在上游均显著高于中、下游 ($p < 0.05$); 0—20 cm 土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷含量均显著高于 20—40 cm ($p < 0.05$), 表聚现象明显; (4) 相关性分析显示水体各形态氮和总磷与土壤全磷和有效磷呈显著正相关 ($p < 0.05$), 冗余分析表明土壤有机碳与各形态氮、磷及化学计量比对水体各形态氮、磷的总解释率达 64.15%, 土壤全磷和有效磷是影响水体面源污染的主导因子。 [结论] 筭溪河面源污染严重, 土壤全磷和有效磷可显著影响水体污染状况, 面源污染治理应重点关注河岸带生态系统。

关键词: 筭溪河流域; 面源污染; 河岸带; 化学计量比

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0117-09

Nonpoint Source Pollution and Its Relationship with Soil Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus of the Riparian Zone in the Sunxi River Watershed

Hou Wenning, Wang Haiyan, Meng Hai, Ning Yihong, Zhao Han, Cui Xue

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,
College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to analyze the spatial heterogeneity of nitrogen and phosphorus in water body and riparian soil, and to explore the effects of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus content on nonpoint source pollution so as to provide a theoretical basis for clarifying the water nonpoint source pollution status and its relationship with the riparian soil of the Sunxi River watershed in Chongqing. [Methods] 44 water samples along the Sunxi River and soil samples at depths of 0—20 cm and 20—40 cm in the riparian zone were collected. We applied the Nemerow index to evaluate water pollution status. The ANOVA and multiple comparison, independent sample t-test, correlation analysis and redundancy analysis were used to study the spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus forms in water body,

收稿日期: 2023-01-28

修回日期: 2023-02-21

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划“三峡库区面源污染景观生态防治技术集成与示范”(2017YFC0505306)

第一作者: 侯文宁(1998—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 15933812933@163.com

通信作者: 王海燕(1972—), 女, 湖北浠水人, 博士, 教授, 主要从事土壤生态学、农业面源污染研究。E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

<http://stbcj.paperonce.org>

soil organic carbon, total and available nitrogen and phosphorus in the riparian zone, and the response of water nitrogen and phosphorus to soil organic carbon, nitrogen, phosphorus forms and their stoichiometric ratios. [Results] (1) The Sunxi River was seriously polluted, and the pollution in the lower reach was more serious than that in the upper and middle reaches. (2) Water total nitrogen, total phosphorus and soluble phosphate in the lower reach of the Sunxi River watershed were extremely significantly higher than those in the upper and middle reach, nitrate nitrogen in the lower reach were extremely significantly higher than that in the middle reach ($p < 0.01$). (3) Soil organic carbon contents at the depth of 20—40 cm in the lower reaches were significantly higher than the middle reach, available phosphorus in the two soil layers and total phosphorus at 20—40 cm were significantly different among the river sections, while soil C/P ratios at 20—40 cm and N/P ratios at 0—40 cm were significantly higher in the upper reach than the middle and lower reaches ($p < 0.05$). The contents of soil organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, total and available phosphate at the depth of 0—20 cm were significantly higher than those at 20—40 cm ($p < 0.05$) with an obvious surface accumulation phenomenon. (4) Correlation analysis indicated that water nitrogen forms and total phosphorus were significantly positively correlated with soil total and available phosphorus ($p < 0.05$), and redundancy analysis showed that the total interpretation rate of soil organic carbon, nitrogen, phosphorus forms and stoichiometric ratios to water nitrogen and phosphorus forms was 64.15%, indicating that soil total and available phosphorus were the main factors affecting nonpoint source pollution. [Conclusion] The nonpoint source pollution of the Sunxi River is severe, and soil total and available phosphorus can significantly affect the water pollution status. The control of nonpoint source pollution should focus on the riparian ecosystem.

Keywords: Sunxi River watershed; nonpoint source pollution; riparian zone; stoichiometric ratio

随着点源污染的逐渐控制,以水体富营养化为重要表现形式的面源污染已成为威胁生态环境的主要因素。氮和磷是水生生态系统中浮游植物生长和分布的必需营养元素,当其浓度达到较高水平时,将存在富营养化风险,造成水质恶化、公共饮用水安全风险以及渔业和其他行业的经济损失^[1]。三峡水库是目前世界上规模最大的水利工程之一,是长江流域重要的淡水资源战略储备库,在长江流域及国家资源战略配置中的作用意义深远^[2]。然而,自三峡大坝建成以来,三峡库区面源污染问题日益严峻,成为国内外关注的焦点^[3]。近年来工业发展迅速,人类活动加剧,化肥施用量逐渐增多,导致农田肥料过剩,再加上库区生态脆弱,水土流失严重,泥沙中携带的土壤氮、磷和未被利用的化肥颗粒在降雨或灌溉后通过地表径流或地下水进入水体,导致面源污染加剧^[4]。

河岸带是衔接“水—陆”生态系统的重要枢纽,其生境状况由多个相对独立、相互影响的环境体系按照生物地球化学循环的变化规律结合在一起,具有一定的生态边界,主要由近岸土壤和水体等核心物质构成,且体系之间存在较高的相关性,其中以河流为主的水体和受流水作用的土壤是河岸带物质循环和能量交换的重要媒介^[5-6]。河岸带土壤是河岸带物质组成的基础,其与生境的关系极其密切,能够随时

响应河岸带生境的变化,是研究河岸带生态的重要内容。有研究表明,河岸带土壤受地形地貌、河流水体、沿岸土地利用及覆盖植被等多重空间特征及其演变的影响,进而影响土壤理化性质的空间异质性^[7],最终导致河岸带土壤有机碳、氮、磷元素分布特征的差异。近年来,已有众多学者对河岸带土壤有机碳、氮、磷进行相关研究,王智等^[8]和杨春璐等^[9]在分别研究崇明岛和海城河河岸带土壤养分分布特征后发现有机碳和氮素在土壤表层聚集;Qian等^[10]研究发现太湖流域河岸带土壤各形态磷含量均随土层深度的增加而降低;赵清贺等^[11]发现群落结构和海拔梯度对黄河中下游典型河段河岸带土壤性质的影响显著;李锐等^[12]对长江上游江津段德感坝河岸带进行了1 a的研究后发现,该河岸带对陆源氮磷有较强的拦截作用。

重庆江津区是长江上游兼三峡库尾较为典型的生态脆弱区,境内流域面积最大的河流是笋溪河。笋溪河流域受华蓥山脉断裂及川东褶皱带的影响,河岸带从上游到下游具有多个典型的地形地貌和相对固定的农业生产结构,土地利用类型相对稳定,河岸植被类型单一,表现出一定的生态适应性^[13]。同时,笋溪河是三峡库区典型的上游入库河流,其河岸带的生态健康状况对三峡库尾地区及长江流域的生态环境

治理具有重要的参考价值。近年来由于人口增长,城镇化速度加快,为获得最大经济效益,大量地带性植被逐渐被农田和园地所取代,加上大力发展旅游业,导致人地矛盾突出,土地利用方式发生改变,植被覆盖度降低,严重影响了河岸带土壤有机碳、氮、磷的循环过程^[14]。前人对于水体及河岸带土壤有机碳、氮、磷的研究或集中在独立的陆地生态系统,或重在研究独立的水体生态系统氮、磷的时空分布特征,又或是侧重水体—沉积物间氮、磷元素的形态分布特征及相互转化,而将陆地—水体综合起来,分析同时期内河岸带生态系统碳、氮、磷的含量特征和存在形态的研究较少。孟海等^[13]研究了河岸带水体—土壤—植物氮磷特征及其对环境因子的响应,但在土壤氮磷对水体面源污染的影响方面还有待深入。为此,本研究以重庆市江津区笋溪河流域干流的河岸带为切入点,基于沿河样点地形信息对全河段进行上、中、下游的划分,依次研究各河段水体面源污染状况以及河岸带土壤的有机碳、氮、磷含量状况,明晰河岸带水体和土壤的空间异质性,并分析河岸带土壤有机碳、氮、磷含量对水体面源污染的影响程度,以期为笋溪河河岸带的生态系统稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

笋溪河(28°37′—29°13′N, 106°15′—106°31′E)坐落于重庆直辖市内西南方向,属于长江上游及三峡库尾区域。河长 120 km,流域面积 1 198 km²,多年平均流速 19.9 m³/s。自然落差 980 m。河流自南向北,经四面山镇、柏林镇、傅家镇、中山镇、李市镇、夹滩镇,最终注入綦江。总体地势南高北低,海拔落差大,在 150~1 800 m 间,地形属川东丘陵。研究区为北半球亚热带湿润季风气候,多年平均气温 16.7℃,

月平均最低和最高气温分别在 1 月(−5.5℃)和 8 月(31.5℃)。河岸带土壤受张力作用和外营力(流水和地质构造)强烈冲蚀切割作用,抗侵蚀能力较弱。由于地形限制,其干流河岸带以慈竹(*Bambusa emeiensis*)等竹类植物为主,并形成带状林地,向河岸带外向区域演替。

1.2 样点选择与区段划分

在 2018—2020 年多次野外踏查的基础上,依据《环境影响评价技术导则地表水环境》(HJ2.3-2018)、《环境影响评价技术导则土壤环境》(HJ964-2018)和《生物多样性观测技术导则陆生维管植物》(HJ710.1-2014),在兼顾笋溪河实际情况和可操作性的基础上,布设河岸带样点 44 个(图 1),样点间隔为(3.0±1.0) km。同时根据记录的各样点海拔、坡度和坡向等环境信息,在 R 中进行聚类分析,从而将笋溪河河段划分为上、中、下游,基本信息见表 1。

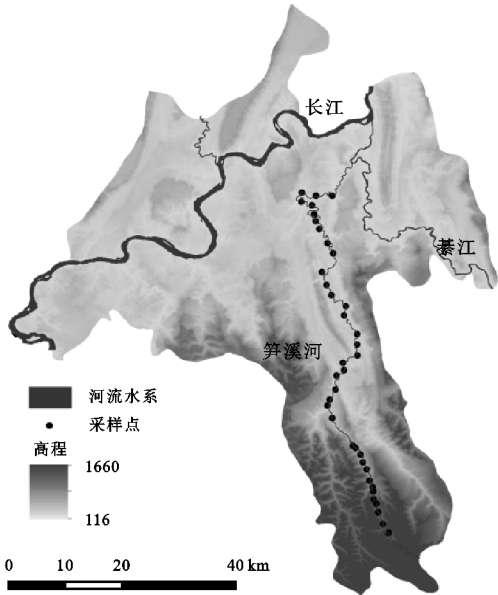


图 1 笋溪河流域采样点

Fig. 1 Sampling sites in the Sunxi River watershed

表 1 笋溪河样点地理信息统计

Table 1 Geographical information statistics of sampling sites along the Sunxi River

河段及样点	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	土壤质地	地形地貌
上游(1~13)	588.85±185.94	38.85±4.06	164.92±85.74	砂质黏壤土	低山
中游(14~31)	210.78±25.71	27.50±4.69	184.28±116.83	砂质壤土	低山、高丘、低丘
下游(32~44)	171.92±4.54	25.23±3.06	134.85±118.00	壤质黏土	低丘、河漫滩、冲积平原

注:数据形式为均值±标准差;下同。坡向与地形地貌类型基于 HJ 710.1-2014 附录 K(中华人民共和国环境保护部,2014)^[15]的实地勘察。

1.3 样品的采集与测定

2020 年 5 月,在距离河岸 3~5 m 内的河流中使用聚乙烯瓶进行水样采集,滴加硫酸调节 pH 为 2 左右,低温保存于便携式冰箱,带回实验室。水体溶解氧采用电化学探头法测定,化学需氧量采用重铬酸盐法,总氮采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法,

硝酸盐氮采用紫外分光光度法,总磷和可溶性磷酸盐采用钼酸铵分光光度法测定^[16]。

在河岸带各样点 100 m 范围内的未受人为扰动的林地,沿河岸“S”形随机布设 5 个采样点,用土钻分别采集 0—20 与 20—40 cm 的土样,并混合均匀。部分新鲜土壤样品存于便携式冰箱,用于硝态氮的测定

(酚二磺酸比色法),另一部分土样经风干、磨细、过筛后测定有机碳(重铬酸钾容量法—稀释热法)、全氮(凯氏定氮法)、全磷(酸溶—钼锑抗比色法)和有效磷(碳酸氢钠浸提法)^[17]。

1.4 数据计算

内梅罗指数法在水质评价中具有一定的普遍性,是最大值法中最典型和应用最广的方法,突出了最大分指数项的影响,兼顾了平均分指数的影响。计算公式^[18]如下:

表 2 筭溪河河岸带水环境质量分级

Table 2 Classification of water environment quality in the riparian zone of the Sunxi River

水质类别	I 类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	V 类	劣 V 类
p	$p \leq 0.59$	$0.59 < p \leq 0.69$	$0.69 < p \leq 1.00$	$1.00 < p \leq 1.51$	$1.51 < p \leq 1.97$	$1.97 < p$
等级划分	优良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染	极度污染

1.5 数据处理

在 Microsoft Excel 2010 进行数据的整理;使用 ArcGIS 10.8 绘制采样点图;使用 R 4.1.3 进行聚类分析;河岸带水体不同形态氮、磷和土壤有机碳、氮、磷的全量和有效量的单因素方差分析和 LSD 多重比较、独立样本 t 检验以及河岸带水体氮、磷与土壤有机碳、氮、磷间的相关性分析均在 SPSS 23 完成;运用 Canoco 5 进行河岸带水体不同形态氮、磷与土壤有机碳、氮、磷全量和有效量之间的冗余分析。

2 结果与分析

2.1 筭溪河水质污染现状评价

水质的内梅罗综合评价指数在上、中、下游有较大的差异。上、中游的内梅罗综合评价指数分别为 1.40 与 1.30,较为接近,均为Ⅳ类水质,属重度污染。下游内梅罗综合评价指数为 2.20,为劣 V 类水质,属

$$p=\sqrt{\frac{(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nC_i)^2+(\max\frac{C_{测}}{S_{标}})^2}{2}} \tag{1}$$

式中: p 为综合指数; $C_{测}$ 为指标测量值; $S_{标}$ 为指标标准值; n 为参与评价的水质指标数量; \max 为水质评价指标的最大值。筭溪河水质以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的Ⅲ类标准为基础,选择溶解氧、化学需氧量、总氮与总磷进行内梅罗综合污染指数计算,得到本文污染等级标准(表 2)。

极度污染,且是上、中游的 1.5 倍多。从全河段来看,内梅罗综合评价指数为 1.60,属严重污染。

2.2 筭溪河水体氮、磷空间分布特征

水体的总氮、硝酸盐氮、总磷和可溶性磷酸盐随河流走向表现出不同的变化规律(表 3)。水体总氮与硝酸盐氮在全河段的含量分别为 (1.82 ± 0.74) 、 (1.29 ± 0.27) mg/L,均高于上游与中游而低于下游,呈现出先减后增、总体增大的变化规律;全河段总磷与可溶性磷酸盐含量分别为 (0.05 ± 0.02) 、 (0.02 ± 0.02) mg/L,高于其上游,低于下游,呈现出逐渐增大的趋势。

上、中游总氮、总磷与可溶性磷酸盐含量极显著低于下游,硝酸盐氮在下游极显著高于中游($p < 0.01$),说明水体总氮、硝酸盐氮、总磷与可溶性磷酸盐受河流区段的影响,下游与上、中游间存在较大差异。而水体 N/P(总氮/总磷)在全河段差异不显著($p > 0.05$)。

表 3 筭溪河河岸带水体氮、磷空间分布特征

Table 3 Spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the riparian zone of the Sunxi River

河段	总氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝酸盐氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	可溶性磷酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氮磷比
上游	$1.43 \pm 0.33\text{B}$	$1.25 \pm 0.27\text{AB}$	$0.04 \pm 0.02\text{B}$	$0.02 \pm 0.02\text{B}$	59.31 ± 58.37
中游	$1.36 \pm 0.27\text{B}$	$1.18 \pm 0.17\text{B}$	$0.04 \pm 0.02\text{B}$	$0.02 \pm 0.01\text{B}$	47.51 ± 26.27
下游	$2.86 \pm 0.32\text{A}$	$1.50 \pm 0.28\text{A}$	$0.07 \pm 0.02\text{A}$	$0.04 \pm 0.01\text{A}$	46.42 ± 15.22
全河段	1.82 ± 0.74	1.29 ± 0.27	0.05 ± 0.02	0.02 ± 0.02	50.67 ± 36.34
F 值	107.05	7.05	10.61	6.73	0.51
显著性	0.00**	0.00**	0.00**	0.00**	0.60

注:同列不同字母表示河段间差异显著,A,B 表示差异极显著($p < 0.01$),若差异不显著则不标注;**表示差异极显著($p < 0.01$)。

2.3 河岸带土壤有机碳、氮、磷及其化学计量比空间分布特征

土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷含量在河流区段和土壤垂直方向上有较大差异(表 4)。土壤有机

碳在 0—20,20—40 cm 土层表现出中游<上游<下游,即先减后增、总体增大的变化规律;筭溪河河流区段显著影响着 20—40 cm 土层土壤有机碳的变化,表现为中游深层土壤有机碳显著小于下游($p < 0.05$)。0—20,

20—40 cm 土层土壤全氮、硝态氮在各河段之间无显著差异($p>0.05$)。两个土层土壤全磷和有效磷含量变化趋势相同,表现为随河流走向显著增大。0—20 cm 土壤全磷在中、下游显著高于上游,20—40 cm 土壤全磷与 0—40 cm 土壤有效磷在各河段间差异显著,表现为上游<中游<下游($p<0.05$)。各河段以及全河段的土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷在不同土层间均表现出相同的变化趋势:0—20 cm 土壤各指标含量均显著高于 20—40 cm($p<0.05$),表聚现象明显。

河流区段对土壤 C/N(有机碳/全氮)、C/P(有机

碳/全磷)和 N/P(全氮/全磷)的影响各不相同。在 0—20,20—40 cm 土层,河岸带各区段土壤 C/N 之间差异不显著($p>0.05$),而土壤 C/P 和 N/P 变化趋势相同,均表现为下游<中游<上游,即沿河流走向,C/P 和 N/P 逐渐减小,0—20 cm 土层上游 C/P 显著高于下游,20—40 cm 土层 C/P 与 0—40 cm 土层 N/P 在上游显著高于中、下游($p<0.05$)。各河段以及全河段的 C/N,C/P 和 N/P 均表现为 0—20 cm 高于 20—40 cm,但仅中游和全河段 C/P 在两个土层之间呈显著差异($p<0.05$)。

表 4 笋溪河河岸带土壤有机碳、氮、磷及其化学计量比空间分布特征

Table 4 Spatial distribution characteristics of soil organic carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometric ratios in the riparian zone of the Sunxi River

河段	土层 深度/cm	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	碳氮比	碳磷比	氮磷比
上游	0—20	8.00±3.06A	0.76±0.29A	4.15±1.77A	0.21±0.07Ab	2.05±0.23Ac	10.57±1.61	40.21±17.14a	3.77±1.42a
	20—40	5.24±2.04Bab	0.50±0.22B	2.86±1.30B	0.16±0.04Bc	0.96±0.16Bc	10.81±1.58	33.58±10.60a	3.13±0.91a
中游	0—20	7.08±1.44A	0.60±0.17A	5.41±3.81A	0.28±0.09Aa	4.05±1.96Ab	12.79±4.62	28.55±13.21Aab	2.27±0.81b
	20—40	4.06±0.74Bb	0.38±0.12B	3.36±1.96B	0.22±0.06Bb	1.77±0.54Bb	11.48±3.15	20.00±6.02Bb	1.88±0.92b
下游	0—20	8.80±2.47A	0.78±0.24A	6.28±3.27A	0.37±0.10Aa	9.38±4.05Aa	11.61±1.92	23.89±4.90b	2.09±0.43b
	20—40	5.97±2.35Ba	0.54±0.21B	4.19±3.21B	0.32±0.09Ba	4.96±1.56Ba	11.30±1.65	19.10±7.55b	1.71±0.63b
全河段	0—20	7.85±2.34A	0.70±0.23A	5.35±3.25A	0.29±0.11A	5.18±3.90A	11.84±3.38	30.16±13.85A	2.61±1.15
	20—40	4.96±1.89B	0.46±0.19B	3.48±2.30B	0.23±0.09B	2.43±1.76B	11.25±2.37	23.26±9.90B	2.15±1.01

注:同列小写字母表示相同土层不同河段间差异显著($p<0.05$),同列大写字母表示各指标相同河段不同土层间差异显著($p<0.05$);若差异不显著则不标注。

2.4 河岸带水体氮、磷与土壤有机碳、氮、磷的相关分析

河岸带水体氮、磷与土壤有机碳、氮、磷存在一定的相关关系(表 5)。在 0—20 cm 土层,除土壤全磷与水体可溶性磷酸盐无显著相关性外,土壤全磷和有效磷均与水体总氮、硝酸盐氮、总磷和可溶性磷酸盐呈显著或极显著正相关,土壤 C/P 和 N/P 与水体总氮和总磷呈显著或极显著负相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$),其他指标间无显著相关性($p>0.05$)。在 20—40 cm 土层,土壤有机碳、全磷和有效磷均与水体总氮、硝酸盐氮、总磷呈极显著正相关($p<0.01$),土壤有效磷与水体可溶性磷酸盐呈极显著正相关($p<0.01$),其他指标间无显著相关性($p>0.05$)。由此可见,土壤全磷和有效磷与水体各形态氮、磷存在密切关系。

2.5 笋溪河河岸带土壤有机碳、氮、磷与水体氮、磷的冗余分析

为进一步探究影响笋溪河水体面源污染的因素,以土壤有机碳、氮、磷及其化学计量比作为解释变量,水体氮、磷和 N/P 作为响应变量,进行冗余分析(RDA)。由 RDA 排序图(图 2)可得,对水体总氮、硝酸盐氮、总磷和可溶性磷酸盐影响较大的有土壤有效

磷、全磷、C/P, N/P。RDA1 约束轴的解释率为 59.84%,RDA2 的解释率为 4.31%,这表明大部分水体氮、磷的变化都可以通过土壤有机碳、氮、磷来解释。两个土层土壤全磷和有效磷、20—40 cm 有机碳与水体总氮、硝酸盐氮、总磷、可溶性磷酸盐之间夹角较小、方向相同,可以认为具有较强的正相关关系,0—20 cm 土层 C/P 和 N/P 与水体总氮、总磷之间夹角较大、方向相反,具有较强的负相关关系。土壤全磷、有效磷、C/P 在 RDA1 轴上投影较长,因此对其贡献较大,而 RDA2 轴只有土壤全磷、有效磷贡献较大。由此可知,水体氮、磷受土壤有机碳、氮、磷的影响,主要来源于土壤全磷和有效磷的作用。水体总氮、总磷对土壤有机碳、氮、磷的响应较硝酸盐氮、可溶性磷酸盐更加明显。

3 讨论

笋溪河水质的变化特征,反映了水体的健康状况和受污染程度,可为水环境的治理、保护提供支撑。笋溪河上游与中游水质的内梅罗综合评价指数分别为 1.40 与 1.30,属重度污染;下游水质的内梅罗综合评价指数为 2.20,超过 V 类 1.97 的标准,属劣 V 类,

对汇入三峡水库及长江均存在较高的风险。

水环境特征及其承载力是衡量流域可持续发展的重要指标之一^[19]。筭溪河水体的总氮、硝酸盐氮、总磷与可溶性磷酸盐具有一定的空间异质性,且受影响的程度因河流区段而异。水体的化学成分及其分布特征是流域水资源质量、环境化学性质和元素循环转化的基础^[20]。在河流各区段的空间变化中,筭溪河水体总氮、硝酸盐氮、总磷与可溶性磷酸盐均呈极显著差异($p<0.01$)。其中,水体总氮与硝酸盐氮表现出中游<上游<下游的变化规律;总磷与可溶性磷酸盐呈现出上游<中游<下游的变化趋势。研究结果与库区香溪河、澎溪河的氮、磷空间分布规律相同,均表现为下游含量较高^[1],但与 Xiang 等^[21]三峡库区中游总氮、总磷最高,上、下游次之的结论有所不同,这是因为筭溪河上游海拔较高,河岸带坡度大,硝酸盐氮迁移能力强,较中游而言,更容易随地下水和

地表径流进入河流。中下游村镇渐多,人口有所增加,常有村民在河畔浣洗衣物,生活污水和农业生产活动的输入导致水体中离子浓度有所增加,加上中游存在回水区,水流速度缓慢,且随着两条大支流的汇入积累了更多的磷,因此,总磷与可溶性磷酸盐在中游略高于上游。下游海拔低,为取得更高的经济效益,抗侵蚀性强的林地逐渐被花椒园、果园及耕地等取代,此外,随着人畜粪便、生活污水及未被耕地作物吸收的肥料进入水体,导致下游各形态氮、磷显著高于上、中游^[22]。氮、磷作为限制水体中藻类生长繁殖的重要元素,可指示水体富营养化风险。已知 N/P 在 10~15 时为藻类生长的最佳条件,当 $N/P<10$ 时,藻类生长受氮的限制,反之,当 $N/P>15$ 时,藻类生长受磷的限制,而氮的供应充足^[23]。本研究结果显示筭溪河流域水体 N/P 为 50.67,说明氮素供应过多,是造成筭溪河水体富营养化的主要风险元素。

表 5 筭溪河河岸带水体氮、磷与土壤有机碳、氮、磷的相关分析

Table 5 Correlation analysis of water nitrogen and phosphorus with soil organic carbon, nitrogen and phosphorus in the riparian zone of the Sunxi River

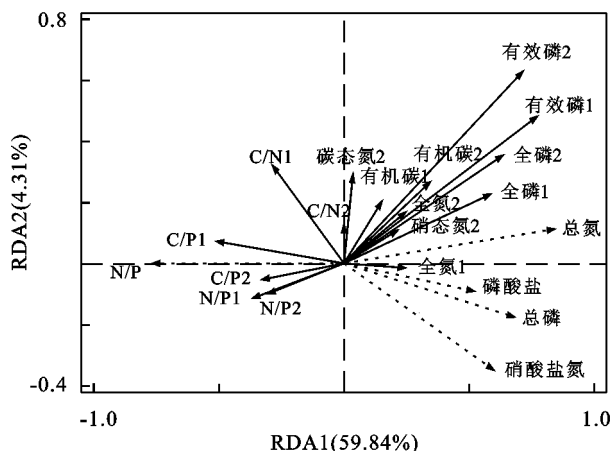
土层 深度/(cm)	水体 土壤	总氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝酸盐氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	可溶性磷酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氮磷比
0—20	有机碳/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.23	0.22	0.14	−0.04	−0.14
	全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.20	0.20	0.20	−0.08	−0.25
	硝态氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.20	0.06	0.18	0.12	−0.13
	全磷/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.51**	0.36*	0.50**	0.19	−0.30
	有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.78**	0.50**	0.68**	0.44**	−0.16
	碳氮比	−0.10	−0.03	−0.21	−0.08	0.23
	碳磷比	−0.34*	−0.19	−0.42**	−0.30	0.23
	氮磷比	−0.31*	−0.21	−0.31*	−0.28	0.10
20—40	有机碳/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.42**	0.42**	0.31*	0.02	−0.14
	全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.30	0.22	0.23	0.11	−0.18
	硝态氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.20	−0.04	0.06	0.23	−0.13
	全磷/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.61**	0.44**	0.56**	0.25	−0.26
	有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.87**	0.49**	0.66**	0.42**	−0.10
	碳氮比	0.05	0.15	0.01	−0.24	0.11
	碳磷比	−0.22	−0.03	−0.28	−0.24	0.13
	氮磷比	−0.25	−0.15	−0.27	−0.12	0.05

注: * 表示相关性显著($p<0.05$), ** 表示相关性极显著($p<0.01$)。

土壤有机碳、氮、磷及其化学计量比的空间分布状况,直接关系着土壤质量及河岸带生境的稳定性,也是生态价值评价的基础。筭溪河 0—20 cm 土层的土壤有机碳、全氮和全磷分别为(7.85±2.34), (0.70±0.23), (0.29±0.11) g/kg, 而 20—40 cm 土层为(4.96±1.89), (0.54±0.21), (0.23±0.09) g/kg, 与库区内香溪河流域河岸带土壤有机碳(24.80 g/kg), 全氮(2.12 g/kg)

和全磷(1.38 g/kg)和涪陵段王家沟流域的 6 种土地利用类型的全氮(1.14~1.49 g/kg)和全磷(0.76~1.32 g/kg)的结果相比,均较小^[24]。由前人的研究结果可知香溪河沿岸地带工业开采及农业施肥较多,导致近河岸带土壤吸收、截留了大量碳、氮、磷等物质,而筭溪河两岸以天然慈竹林为主,树种类型及林分结构过于单一,未能形成大量枯落物增加土壤养分含

量,且受河流水文作用明显,养分的累积量也较小,因此明显低于相近流域不同土地利用类型的土壤。笋溪河河岸带 0—20 cm 土层的土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷的含量均显著高于 20—40 cm 土层 ($p < 0.05$),这与霍莉莉等^[25]在兴凯湖地区沼泽湿地和蔡雅梅等^[26]在汾河河岸带得出的随土层深度增加,土壤养分逐渐减少的结论一致,由于表层枯枝落叶多,微生物活动旺盛,供植物吸收利用的养分丰富,加上根系大多数存在于 0—20 cm 土层,其对土壤有机碳、氮、磷的吸收作用大于 20—40 cm 土层。笋溪河下游土壤有机碳、全磷和有效磷显著高于上、中游 ($p < 0.05$),沿河流走向,海拔逐渐降低,影响土壤有机碳分解的水热等环境条件发生变化,下游多农田,施肥量大,在移动过程中极易被河岸带土壤固定^[9]。研究区 0—40 cm 土层土壤 C/N, C/P, N/P 均值分别为 11.55, 26.71, 2.38, 其中 C/N 略小于中国陆地平均水平 (11.9), C/P, N/P 均明显低于我国平均水平 (61, 5.2)^[27], C/N 是土壤氮素矿化的标志, C/N 越大,其释放的有效氮量则越少^[28], C/P, N/P 分别是量度土壤微生物矿化有机质释放磷或从环境中固定磷的能力和判断限制性养分的重要指标, 较低的土壤 C/P, N/P 说明微生物分解枯枝落叶受磷的限制较小, N/P < 14 说明河岸带土壤处于氮素缺乏状态,这主要是因为氮易溶于水,易随水流失,而磷是一种沉积性物质,在土壤中迁移率相对较低^[29]。



注: N/P 指水体总氮与总磷之比, C/N1, C/P1, N/P1 和 C/N2, C/P2, N/P2 分别为土壤有机碳与全氮、有机碳与全磷、全氮与全磷在 0—20 与 20—40 cm 土层之比。

图 2 笋溪河河岸带水体氮、磷与土壤有机碳、氮、磷的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of water nitrogen and phosphorus and soil organic carbon, nitrogen and phosphorus in the riparian zone of the Sunxi River
笋溪河河岸带水体总氮、硝酸盐氮、总磷、可溶性

磷酸盐与土壤全磷和有效磷呈显著正相关关系 ($p < 0.05$),而与土壤有机碳、C/P 和 N/P 的相关性受土层深度的影响存在较大差异,如:水体总氮、总磷与 0—20 cm 土层土壤的 C/P 和 N/P 均呈显著负相关 ($p < 0.05$),而总氮、硝酸盐氮和总磷仅与 20—40 cm 土层的有机碳呈显著正相关 ($p < 0.05$)。这与孙婷婷等^[24]水体总氮与土壤全氮呈显著负相关的结论相反。香溪河位于三峡库区库首,其河岸带土壤受河流水位涨消因素、沿岸土地利用类型和污染原排放的影响较为强烈,而笋溪河位于三峡库尾,所受影响较小。笋溪河河岸带水体 N/P 为 50.67,而土壤中 N/P 仅为 2.38,河岸带水体高氮低磷,而土壤则处于高磷低氮的状态,且土壤中全磷和有效磷与水体氮、磷含量密切相关,说明笋溪河河岸带土壤全磷和有效磷含量是水体面源污染的主导因子,在今后的生产生活中应注意减少磷肥的施用,减少生活污水及人畜粪便未经处理直接排入河内。水体氮、磷的含量受植被种类、水文条件、地形地貌和土地利用等多种因素的影响,本文仅分析了土壤有机碳、氮、磷对其的影响,今后应从多角度、多尺度、多因子探索笋溪河水体面源污染的原因,为保障三峡库尾生态系统的稳定提供更全面的数据支撑。

4 结论

(1) 笋溪河水体全河段属严重污染,其中上、中游属重度污染,下游属极度污染。

(2) 水体氮、磷含量表现出明显的空间异质性。总氮、硝酸盐氮、总磷与可溶性磷酸盐均有明显的下游汇聚现象,分别为 (2.86 ± 0.32) , (1.50 ± 0.28) , (0.07 ± 0.02) , (0.04 ± 0.01) mg/L,总氮和硝酸盐氮呈现中游 < 上游 < 下游的变化规律,总磷与可溶性磷酸盐为上游 < 中游 < 下游,逐渐增大。

(3) 土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷含量均表现出表层富集和下游聚集的变化特征,有机碳、全氮和全磷在下游 0—20 cm 土层的含量分别为 (8.80 ± 2.47) , (0.78 ± 0.24) , (0.37 ± 0.10) g/kg。下游 20—40 cm 土层土壤有机碳含量显著高于中游,20—40 cm 土层土壤全磷和 0—40 cm 土层土壤有效磷在各河段间差异显著 ($p < 0.05$),空间异质性明显。此外,河岸带土壤有机碳、全氮、硝态氮、全磷和有效磷含量,以及中游和全河段土壤 C/P 在 0—20, 20—40 cm 土层间均呈显著差异 ($p < 0.05$);两个土层的土壤 N/P 和 20—40 cm C/P 在上游显著高于中、下游 ($p < 0.05$)。

(4) 水体氮、磷含量受土壤有机碳、氮、磷因素的影响。土壤全磷和有效磷是影响水体总氮、硝酸盐氮、总磷和可溶性磷酸盐含量变化的主导因子。

参考文献:

- [1] 卢珏安, 湛书, 蒋卉, 等. 三峡水库典型支流水体氮磷分布特征及污染评价[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2019, 44(1): 104-112.
Lu Y A, Chen S, Jiang H, et al. Nitrogen and phosphorus distribution characteristic and pollution evaluation in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(1): 104-112.
- [2] 谢忠洲, 陈德敏. 淡水资源战略储备库的概念意蕴和制度建构: 以三峡库区淡水资源战略储备库为实践样本[J]. 中国软科学, 2022, 13(1): 7-19.
Xie Z Z, Chen D M. Conceptualization and institutional construction of the strategic reserve of freshwater resources: taking the strategic reserve of freshwater resources in Three Gorges Reservoir Area as a practical sample[J]. China Soft Science, 2022, 13(1): 7-19.
- [3] Chen X M, Xu G H, Zhang W S, et al. Spatial variation pattern analysis of hydrologic processes and water quality in Three Gorges Reservoir Area[J]. Water, 2019, 11(12): 2608.
- [4] Sharma A, Tiwari K N. Predicting non-point source of pollution in Maithon reservoir using a semi-distributed hydrological model[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(8): 522.
- [5] Capon S J, Pettit N E. Turquoise is the new green: Restoring and enhancing riparian function in the Anthropocene [J]. Ecological Management and Restoration, 2018, 19(S1): 44-53.
- [6] 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 879-886.
Han L, Wang H Z, Yu J. Research progress and prospects on riparian zone ecology[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 879-886.
- [7] 王琼, 范康飞, 范志平, 等. 河岸缓冲带对氮污染物削减作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 665-677.
Wang Q, Fan K F, Fan Z P, et al. Nitrogen pollutant removal by riparian buffer zone: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 665-677.
- [8] 王智, 陈刚亮, 李建华. 崇明岛不同类型河岸带土壤碳氮分布特征[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(22): 9266-9269.
Wang Z, Chen G L, Li J H. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen in different riparian zones in Chongming Island[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(22): 9266-9269.
- [9] 杨春璐, 马溪平, 李法云, 等. 海城河河岸带土壤理化性质分析[J]. 生态科学, 2010, 29(3): 262-267.
Yang C L, Ma X P, Li F Y, et al. Analysis of soil physical and chemical properties in the coastal zone of Haicheng River[J]. Ecological Science, 2010, 29(3): 262-267.
- [10] Qian J, Shen M M, Wang P F, et al. Fractions and spatial distributions of agricultural riparian soil phosphorus in a small river basin of Taihu area, China[J]. Chemical Speciation and Bioavailability, 2017, 29(1): 33-41.
- [11] 赵清贺, 刘倩, 马丽娇, 等. 黄河中下游典型河岸带土壤性质空间变异及其对环境的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3795-3802.
Zhao Q H, Liu Q, Ma L J, et al. Spatial variation in riparian soil properties and its response to environmental factors in typical reach of the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3795-3802.
- [12] 李锐, 牛江波, 杨超, 等. 长江上游江津段河岸带对陆源氮磷的拦截作用研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(10): 11-19.
Li R, Niu J B, Yang C, et al. Study on the interception of riparian to nitrogen and phosphorus at deganba of Jiangjin in the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2017, 39(10): 11-19.
- [13] 孟海, 王海燕, 侯文宁, 等. 重庆筭溪河流域河岸带水体—土壤—植物的氮磷特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 275-282, 291.
Meng H, Wang H Y, Hou W N, et al. Nitrogen and phosphorus characteristics and influencing factors in water-soil-plant system in the riparian zone of the Sunxi River Watershed, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 275-282, 291.
- [14] 郑永林, 王海燕, 王一格, 等. 三峡库区筭溪河流域面源污染及其与土壤可蚀性 k 值的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 208-213.
Zheng Y L, Wang H Y, Wang Y G, et al. Non-point source pollution and its relationship with soil erodibility k value in the Sunxi River watershed, Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(1): 208-213.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. HJ 710.1-2014 生物多样性观测技术导则陆生维管植物[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021: 1-25.

- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 710.1-2014 Technical guidelines for biodiversity observation-Terrestrial vascular plants [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021:1-25.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. HJ2.3-2018 环境影响评价技术导则地表水环境[S].北京:中国标准出版社, 2021:1-50.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ2.3-2018 Technical guidelines for environmental impact assessment-Surface water environment[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-50.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000:14-111.
- Bao S D. Soil Agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:14-111.
- [18] 陆雍森.环境评价[M].上海:同济大学出版社,1999.
- Lu Y L. Environmental assessment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.
- [19] 曾现进,李天宏,温晓玲.基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J].环境科学与技术, 2013, 36(6):200-205.
- Zeng X J, Li T H, Wen X L. Analysis on carrying capacity of water environment in Yichang City based on AHP and vector norm method[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(6):200-205.
- [20] Nweze N, Eze E C. Physico-chemical water quality characteristics of upper Ebonyi River, Enugu State, Nigeria[J]. African Journal of Aquatic Science, 2018, 43:417-421. DOI:10.2989/16085914.2018.1517078.
- [21] Xiang R, Wang L J, Li H, et al. Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768:144866.
- [22] Hou W N, Wang H Y, Zheng Y L, et al. Seasonal variation characteristics of water quality in the Sunxi River Watershed, Three Gorges Reservoir Area[J]. Peerj, 2022, 10:e14233.
- [23] 孙卫波,陈诗越,陈影影,等.黄河下游湖泊水化学特征与水体营养类型评价[J].中国农学通报, 2011, 27(6): 338-341.
- Sun W B, Chen S Y, Chen Y Y, et al. The assessment of hydrochemistry characteristics and eutrophication types of lakes in lower reaches of the Yellow River[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 338-341.
- [24] 孙婷婷,唐涛,申恒伦,等.香溪河流域不同介质中碳、氮、磷的分布特征及相关性研究[J].长江流域资源与环境, 2015, 24(5):853-859.
- Sun T T, Tang T, Shen H L, et al. Spatial distributions of carbon, nitrogen, and phosphorus in various mediums of the Xiangxi River Watershed and their correlations[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5):853-859.
- [25] 霍莉莉,邹元春,郭佳伟,等.垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响[J].环境科学, 2013, 34(1):283-287.
- Huo L L, Zou Y C, Guo J W, et al. Effect of reclamation on the vertical distribution of SOC and retention of DOC[J]. Environmental Science, 2013, 34(1):283-287.
- [26] 蔡雅梅,冯民权.汾河河岸带土壤氮、磷的时空分布规律及其影响因素研究[J].水土保持学报, 2021, 35(4): 222-229, 236.
- Cai Y M, Feng M Q. Study on the spatial and temporal distribution and influencing factors of soil nitrogen and phosphorus in riparian zone of Fenhe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):222-229, 236.
- [27] 卞福花,吴秋堂,吴梦迪,等.不同水盐生境下芦苇湿地植被及土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].应用生态学报, 2022, 33(2):385-396.
- Bian F H, Wu Q T, Wu M D, et al. C : N : P stoichiometry in plants and soils of *Phragmites australis* wetland under different water-salt habitats[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2):385-396.
- [28] 汪宗飞,郑粉莉.黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报, 2018, 38(19): 6870-6880.
- Wang Z F, Zheng F L. C, N, and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziwuling Region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19):6870-6880.
- [29] 郭二辉,方晓,马丽,等.河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响:以温榆河为例[J].生态学报, 2020, 40(11):3785-3794.
- Guo E H, Fang X, Ma L, et al. Effects of different recovery years on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in riparian farmland: A case study of Wenyu River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11):3785-3794.