重庆笋溪河流域河岸带水体一土壤一植物的 氮磷特征及影响因素

孟海,王海燕,侯文宁,赵晗,宁一泓

(森林培育与保护教育部重点实验室,北京林业大学林学院,北京 100083)

摘要:为明晰重庆笋溪河流域河岸带水体、土壤和植物的氮磷特征及其影响因素,采用描述性统计、聚类分析、相关分析和冗余分析的方法,探讨三峡库尾小流域河岸带水体、土壤和植物的氮、磷含量特征、空间分布和各圈层氮磷的相关性及水体氮磷的影响因素。结果表明:(1)河岸带受河流区段影响,从上游到下游,水体氮磷与土壤全氮的含量先减小后增大,下游存在明显的农业氮输入,而土壤硝态氮、全磷和有效磷与植物氮磷的含量逐渐增加;(2)河岸带水体总氮与植物不同营养器官的氮含量均呈显著正相关(P<0.01),水体总磷与土壤全磷和有效磷均呈显著正相关(P<0.001),且土壤全磷、有效磷均与海拔呈显著负相关(P<0.001);(3)河岸带水体氮磷受土壤氮磷、植物氮磷和地形的影响,其中土壤氮磷为主导因子,且土壤20—40 cm 有效磷、0—20 cm 有效磷、20—40 cm 全磷、0—20 cm 全磷和 0—20 cm 硝态氮的置换检验均达到显著水平(P<0.05),变异解释率依次为 25.11%,21.71%,11.14%,8.13%和 3.05%。河流区段对河岸带水体、土壤和植物中的氮磷含量有影响,从上游到下游,氮磷含量逐渐积聚,而差异性减小;河岸带水体、土壤和植物中的氮、磷彼此间存在一定的相关性,同时受海拔、坡度和坡向的影响。耕地是造成流域下游农业面源污染的主要原因,需加强中下游河岸带植物防护和堤岸土壤保持的能力及优化河岸带的土地利用结构,为三峡库区小流域农业面源污染控制提供依据。

关键词:河岸带;氮;磷;相关分析;冗余分析

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)02-0275-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.035

Nitrogen and Phosphorus Characteristics and Influencing Factors in Water-Soil-Plant System in the Riparian Zone of the Sunxi River Watershed, Chongqing

MENG Hai, WANG Haiyan, HOU Wenning, ZHAO Han, NING Yihong

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,

College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to clarify the characteristics of nitrogen and phosphorus and influencing factors in water-soil-plant system in the riparian zone of the Sunxi River watershed, Chongqing, the descriptive statistics, cluster analysis, correlation analysis and redundancy analysis were carried out to study the characteristics of nitrogen and phosphorus content and spatial distribution in water, soil and plants in the riparian zone of the small watershed at the end of the Three Gorges Reservoir, as well as to study the correlation between nitrogen and phosphorus in each sphere and the factors influencing nitrogen and phosphorus in water. The results showed that: (1) The riparian zone was affected by the river section. From upstream to downstream, the content of nitrogen and phosphorus in water and soil total nitrogen decreased first and then increased, while the content of nitrogen and phosphorus in the plant, soil nitrate nitrogen, total and available phosphorus gradually increased. There existed an obvious agricultural nitrogen input in the downstream. (2) The total nitrogen content in water was significantly positively related to the nitrogen content in different vegetative organs of plant (P < 0.01). Total phosphorus content in water was significantly positively related to soil total and available phosphorus content were

收稿日期:2021-09-29

资助项目:国家"十三五"重点研发计划项目(2017YFC0505306)

第一作者: 孟海(1991—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤学研究。E-mail: 16603479962@163.com

通信作者:王海燕(1972—),女,博士,教授,主要从事土壤学、植物营养学研究。E-mail; haiyanwang72@aliyun.com

significantly negatively related to altitude (P < 0.001). (3) The content of nitrogen and phosphorus in riparian water were affected by the content of soil nitrogen and phosphorus, plant nitrogen and phosphorus and topography, and among them, soil nitrogen and phosphorus were the dominant factors. The permutation test of available phosphorus at soil depth of 20-40 cm, available phosphorus at 0-20 cm, total phosphorus at 0-20 cm and nitrate nitrogen at 0-20 cm were all significant (P < 0.05), with the variation interpretation rate of 25.11%, 21.71%, 11.14%, 8.13% and 3.05%, respectively. The river section had an impact on the content of nitrogen and phosphorus in the water, soil and plants in the riparian zone. From upstream to downstream, nitrogen and phosphorus gradually accumulated, but the difference decreased. Nitrogen and phosphorus in water, soil and plants had a certain correlation with each other, and were also affected by altitude, slope and aspect. Cultivated land was the main cause of agricultural non-point source pollution in the lower reaches of the river basin. It was necessary to strengthen the ability of plant protection and soil conservation in the middle and lower reaches, and to optimize the land use pattern in the riparian zone, so as to provide a basis for agricultural non-point source pollution control in small watersheds in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: riparian zone; nitrogen; phosphorus; correlation analysis; redundancy analysis

河岸带是衔接"水一陆"生态系统的重要枢纽。其中,以河流为主的水体和受流水作用的土壤是该系统物质循环和能量交换的重要媒介[1],而植物在二者的交互作用和水文地理的影响下,表现出区域特有的植物群落特征[2]。根据我国农业面源污染问题的相关研究[3-4],流域内污染源的控制和削减是生态治理的关键。河岸带具有水陆横向交替、河水径向汇集和山川垂直分布的空间特性,将流域内的地形因子和氮、磷元素紧密地联系在一起,映射出重要的环境信息,对从流域源头控制农业面源污染物具有重要参考。

目前,关于河岸带氮、磷的研究多集中在相对独 立的水域或陆地生态系统,如对河流、湖泊等水体中 单一营养元素的存在形态及分布状况[5-7],营养物质 在水体--沉积物间的释放、迁移和转化[8],以及通过 模型对陆地生态系统的土壤侵蚀、水土流失和营养物 质运移过程进行模拟和估算等[9-10]。这些研究或侧 重水体氮磷的迁移转化,或侧重估算整个陆源性氮、 磷对水体的输入,但尚未从流域生态的视角去综合分 析氮磷在一个时期内"水体—土壤—植物"中的分布 状况。此外,流域的地形地貌以及河流上下游特征是 引起土地利用方式和河岸带生境不同的主要因 素[11-12],也将影响河岸带水体—土壤—植物体系的氮 磷分布格局,需要进行量化分析。因此,在流域尺度 上研究河岸带不同介质中氮磷的分布特征及影响因 素,更能完整地反映整个流域内的氮磷特性,对于科 学指导人类活动和合理防控流域面源污染具有重要 的生态学意义。

笋溪河位于重庆市江津区,其流域健康状况对三峡库尾地区的农业面源污染防控具有重要的参考价值^[12]。三峡库区的氮磷污染负荷具有明显的时空差

异性,且研究多集中于库区腹地的降雨径流、土地利用及其水土流失等某单一过程或单一尺度[13-14],库尾地区的研究相对较少。此外,库区景观格局变化对农业面源污染的影响机制需要进一步研究[11]。笋溪河流域河岸带受华蓥山脉断裂及川东褶皱带的影响,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,表现出一定的生态适应性[15],对农业氮磷污染和水土流失防控具有直接现实性。因此,本研究以笋溪河干流河岸带为研究对象,在同一时期内采集水体、土壤和植物样品,分析水体、土壤和植物中的氮、磷含量特征及其影响因素,探讨氮磷在河岸带各圈层中的分布规律、相关性以及对环境因子的响应程度,以期为库区农业面源污染防控提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

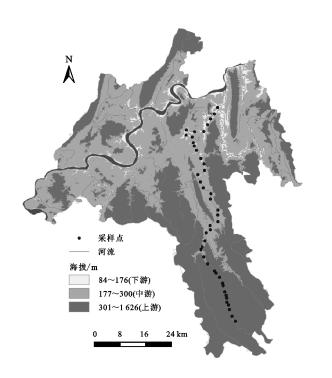
笋溪河流域位于重庆市江津区(图 1)。流域面积约 1 190 km²,属川东丘陵,海拔 180~1 700 m,地势南高北低。河流自南向北流向,从四面山流出,途径四面山镇、傅家镇、蔡家镇、嘉坪镇、夹滩镇,并于支坪镇汇入綦江。流域温度和降水随海拔梯度变化明显,其年均气温 13.7 ℃,年平均降水量 1 522.3 mm,属北半球亚热带季风性湿润气候区。河岸带土地利用以耕地和天然林地为主,土壤受红色砂岩层的张力和外营力冲蚀切割的作用,发育类型多样,基本呈酸性或微酸性。流域内植物种类丰富,具有典型的亚热带常绿阔叶林特征,河岸带主要是以慈竹(Bambusa emeiensis)等竹类植物为主。

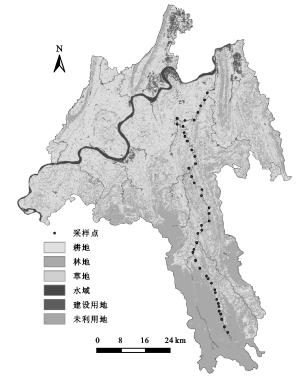
1.2 样点选择与区段划分

依据《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ

2.3—2018) 《环境影响评价技术导则 土壤环境》(HJ 964—2018) 和《生物多样性观测技术导则 陆生维管植物》(HJ 710.1—2014) [16-18], 在兼顾笋溪河实际情况和可操作性的基础上, 从河流的发源地四面山北麓开始布设河岸带样点, 顺流而下至汇入綦江, 共设置 44个样点(图 1)。样点间隔>3 km, 位置为 28°31′14″—28°

46′00″N,106°17′22″—106°30′00″E。于 2021 年 5 月下旬枯水期结束前,同步采集河岸带样点的水体、土壤及植物样品,并记录样点的地形环境,具体包含海拔、坡度和坡向 3 个定量因子,坡位和地形地貌 2 个定性因子。根据 3 个定量因子,在 R 软件中进行样点的聚类分析,最终将笋溪河沿河流域分为上、中、下游(表 1)。





注:采样点 n=44。

图 1 重庆市江津区高程、土地利用及采样点

表 1 笋溪河样点信息

河段	样点	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	坡位	地形地貌类型
上游	1~13	588.85 ± 185.94	38.85 ± 4.06	$61 \sim 283$	下坡、沟谷	低山
中游	$14\sim31$	210.78 ± 25.71	27.50 ± 4.69	$49 \sim 353$	下坡、沟谷	低山、高丘、低丘
下游	$32\sim44$	171.92 ± 4.54	25.23 ± 3.06	$17 \sim 343$	下坡、沟谷	低丘、河漫滩、冲积平原

注:海拔与坡度的数据形式为均值士标准差;坡向为范围;坡位与地形地貌类型基于 HJ 710.1—2014 附录 $K^{[18]}$ 勘察;n=44。

1.3 样品采集与测定

河岸带样点附近,距离河岸3~5 m内的河流即为水质采样点,用聚乙烯瓶采集。现场测定水体pH、温度、电导率和溶解氧,同时用聚乙烯瓶装好待测水样,滴加硫酸,调节pH为2左右,低温保存于便携式冰箱,及时带回实验室,分析水体总氮(WTN)、硝酸盐(WNN)、总磷(WTP)和可溶性磷酸盐(WDP)[16]。

在河岸带样点 100 m 范围内,沿河岸"S"形随机布设 5 点采集 0-20, 20-40 cm 的混合土样,其中新鲜土壤样品存于便携式冰箱,用于硝态氮(SNN)的测定;另一部分土样经风干、磨细过筛后测定全氮(STN)、全磷(STP)和有效磷(SAP),其中 STN1、SNN1、STP1 和SAP1表示 0-20 cm 土壤养分,STN2、SNN2、STP2和 SAP2表示 20-40 cm 土壤养分[17]。

植物样品的采集基于河岸带土壤样点和竹林的

聚群分布特征。在土壤样点附近,随机选取 3~5 株 1 年生幼竹(慈竹),分叶片(L)、分枝(B)和茎竿(S) 采集混合样品,测定植物全氮(PN)和全磷(PP),其中 PLN、PBN 和 PSN 表示植物叶片氮、分枝氮和茎竿氮,PLP、PBP 和 PSP 表示植物叶片磷、分枝磷和茎竿磷^[18]。

1.4 统计方法

采用 Excel 2019 和 R 4.1.1 软件处理数据并绘制图表。其中,Excel 2019 用于数据整理和描述性统计,R 软件进行聚类分析、相关分析和冗余分析及其蒙特卡罗(Monte Carlo)置换检验。

2 结果与分析

2.1 河岸带水体、土壤和植物的氮磷含量特征

笋溪河河岸带水体氮含量高,磷含量低,而氮变

异程度低于磷,且受河流区段的影响(表 2)。从上游到下游,WTN、WNN、WTP和WDP的含量均呈先减后增、总体变大的现象。根据GB3838—2002^[19],筹溪河上游WTN均值为1.43 mg/L,中游为1.36 mg/L,属IV类水质,而下游为2.86 mg/L,属劣V类水质;河流WTP含量均值未超出地表II类水质0.10 mg/L的限值。河流整体表现高氮低磷、下游氮磷积聚的特征。笋溪河上、中游WNN的含量略小于

WTN,而 WDP 在全河段 WTP 含量中占比近半,说明水体氮的形态以硝酸盐为主,且上、中游表现明显,而水体中磷的形态组成相对稳定。同时,WTN 和WNN 从中等变异转为弱变异,WTP 和WDP 从强变异转为中等变异,且WTN、WTP 和WDP 的变异系数均随河流下行而递减,WNN则表现为先减后增、总体变小。说明随区段下行,样点数增大,水体氮、磷含量的差异逐渐减小。

表 2 笋溪河河岸带水体氮磷统计

河段(样点)	相关指标	WTN	WNN	WTP	WDP
	范围/(mg·L ⁻¹)	0.99~2.06	0.89~1.69	0.02~0.09	0~0.06
上游(1~13)	均值士标准差/(mg•L ⁻¹)	1.43 ± 0.33	1.25 ± 0.27	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.02
	变异系数/%	22.73	21.76	50.43	93.40
	范围/(mg·L ⁻¹)	$0.98 \sim 1.91$	$0.92 \sim 1.5$	$0.01 \sim 0.07$	0~0.03
中游(14~31)	均值±标准差/(mg•L ⁻¹)	1.36 ± 0.27	1.18 ± 0.17	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.01
	变异系数/%	20.20	14.55	50.31	47.46
	范围/(mg·L ⁻¹)	$2.57 \sim 3.67$	$1.33 \sim 2.36$	$0.04 \sim 0.10$	$0.02 \sim 0.07$
下游(32~44)	均值±标准差/(mg•L ⁻¹)	2.86 ± 0.32	1.50 ± 0.28	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01
	变异系数/%	11.24	18.58	24.67	37.56

注:变异系数(CV)≤20%,属弱变异;20%<CV<50%,属中等变异;CV≥50%,属强变异[20]。下同。

河岸带土壤氮磷含量受河流区段影响呈现不同的变化规律(表 3)。各河段样点土壤 0—20 cm 的STN、SNN、STP和 SAP的含量均高于 20—40 cm,河岸带土壤氮磷表层富集明显。STN含量的变化趋势与WTN相同,表现出随河流区段下移先减后增,总体增大,而SNN、STP和 SAP含量则逐渐递增,说明STN与WTN存在较高的关联度,且下游河段土

壤氮磷的含量较高。河岸带土壤氮磷含量变化的差异较大,其中 STN 和 STP 均为中等变异,STN 在上游样点的变异性依次高于下游和中游,而 STP 除河段外,还受土层影响,其 0—20 cm 的变异随河段下移而减小,20—40 cm 的变异则先增后减;SNN 的变异性在各河段均高于 STN,而 SAP 的变异性在上游小于 STP,在中、下游大于 STP。

表 3 笋溪河河岸带土壤氮磷统计

河段(样点)	土层深度/cm	相关指标	STN	SNN	STP	SAP
		范围	0.34~1.13	1.29~6.72	0.11~0.33	1.74~2.42
	0 - 20	均值士标准差	0.76 ± 0.29	4.15 ± 1.77	$\textbf{0.21} \!\pm\! \textbf{0.07}$	2.05 ± 0.22
上游(1~13)		变异系数/%	37.57	42.69	34.05	11.18
上(折(1~13)		范围	$0.24 \sim 0.89$	$0.77 \sim 4.81$	$0.08 \sim 0.20$	$0.75 \sim 1.31$
	20 - 40	均值士标准差	0.50 ± 0.22	2.86 ± 1.30	0.16 ± 0.04	0.96 ± 0.16
		变异系数/%	43.18	45.51	26.37	17.19
		范围	0.28~0.86	$1.52 \sim 14.97$	$0.13 \sim 0.46$	2.06~9.61
	0 - 20	均值士标准差	0.60 ± 0.17	5.41 ± 3.81	0.28 ± 0.09	4.05 ± 1.96
中海(14 91)		变异系数/%	27.79	70.50	32.26	48.38
中游(14~31)	20-40	范围	$0.22 \sim 0.70$	$1.42 \sim 8.56$	0.11~0.35	$0.75 \sim 2.74$
		均值士标准差	0.38 ± 0.12	3.36 ± 1.96	0.22 ± 0.06	1.77 ± 0.54
		变异系数/%	32.54	58.52	28.98	30.45
		范围	$0.32 \sim 1.04$	2.00~15.14	$0.22 \sim 0.52$	3.84~16.38
	0 - 20	均值士标准差	0.78 ± 0.24	6.28 ± 3.27	0.37 ± 0.10	9.38 ± 4.05
下游(32~44)		变异系数/%	30.50	52.02	27.92	43.18
下 (J) (32~44)		范围	0.19~0.97	$1.29 \sim 10.78$	$0.17 \sim 0.45$	$2.56 \sim 7.43$
	20 - 40	均值士标准差	0.54 ± 0.21	4.19 ± 3.21	0.32 ± 0.09	4.59 ± 1.56
		变异系数/%	39.07	76.69	28.68	34.07

注:STN 和 STP 含量单位为 g/kg;SNN 和 SAP 含量单位为 mg/kg。

河岸带竹林的氮、磷营养特征受河流区段和自身营养器官的影响(表 4)。从上游到下游 PLN、PBN、PSN、PBP 和 PSP 含量逐渐增大,而 PLP 含量逐渐减小;植物

氮磷均表现出叶片>分枝>茎竿; PLN 和 PLP 的变异均呈递减趋势; PBN 和 PBP 的变异则先增后减, 总体递减; PSN 和 PSP 的变异先减后增, 总体递减。

表 4	धं
-----	----

河段	相关指标		植物全氮		植物全磷			
(样点)	相大组协	PLN	PBN	PSN	PLP	PBP	PSP	
	范围/(g·kg ⁻¹)	15.48~36.82	5.93~17.13	1.53~5.74	1.30~3.86	0.63~2.32	0.26~1.47	
上游(1~13)	均值±标准差/(g・kg ⁻¹)	22.9 ± 4.95	9.30 ± 3.07	3.04 ± 1.30	2.14 ± 0.68	1.39 ± 0.54	0.82 ± 0.37	
	变异系数/%	21.62	33.04	42.94	31.61	38.62	44.78	
	范围/(g·kg ⁻¹)	$18.36 \sim 36.30$	$6.04 \sim 19.27$	$2.20 \sim 9.98$	$1.22\sim2.59$	$0.50 \sim 2.73$	$0.45 \sim 1.41$	
中游(14~31)	均值±标准差/(g・kg ⁻¹)	25.64 ± 5.17	11.65 ± 4.38	5.84 ± 2.00	1.83 ± 0.42	1.50 ± 0.59	0.93 ± 0.24	
	变异系数/%	20.18	37.56	34.31	23.10	39.27	25.77	
	范围/(g•kg ⁻¹)	$21.75 \sim 36.48$	$7.80 \sim 20.68$	3.73~13.51	1.19~2.17	$0.70 \sim 2.15$	$0.56 \sim 2.14$	
下游(32~44)	均值±标准差/(g・kg ⁻¹)	27.92 ± 3.98	13.45 ± 3.62	8.21 ± 3.12	1.69 ± 0.32	1.52 ± 0.40	1.08 ± 0.42	
	变异系数/%	14.25	26.88	37.99	18.72	26.42	38.79	

2.2 河岸带水体、土壤和植物氮磷含量与地形的相 关分析

氮和磷是陆地生态系统中的限制性养分元素,广泛存在于无机界和有机体中。河岸带水体、土壤和植物中的氮磷在各圈层的物质循环中相互作用,存在一定的相关性,且受地形因素的影响。各河段的相关性分析存在多种因素的影响,为了减小误差,以下均为河岸带全河段的氮磷分析。

河岸带水体、土壤和植物氮与地形的相关分析 (表 5)显示, WTN 与 WNN、STN1 与 SNN1、STN2 与 SNN2、PLN 与 PBN 及 PBN 与 PSN 均呈显著正相关,说明氮在水体、土壤和植物不同营养器官中均

有一定的存在形式,且通过含氮物质的迁移转化形成较强的正向相关性。此外,WTN与STN2呈显著正相关(P < 0.05),与PLN、PBN和PSN呈显著正相关(P < 0.01),与PLN、PBN和PSN呈显著正相关(P < 0.05);WNN与PLN呈显著正相关(P < 0.05);WNN与PLN呈显著正相关(P < 0.01)。表明水体与植物的氮相关性高于水体与土壤,水体总氮对海拔的响应强烈。SNN1与PBN和PSN,SNN2与PSN均呈显著正相关,土壤硝态氮对植物分枝和茎竿有显著影响,且随土层深度增加影响减弱。地形对植物氮的影响较为明显,其中海拔与PLN、PBN和PSN呈显著负相关(P < 0.05,P < 0.05和P < 0.001),坡度与PSN呈显著负相关(P < 0.001)。

表 5 笋溪河河岸带水体、土壤和植物氮与地形的相关分析

	表 5 ,									
指标	WTN	WNN	STN1	STN2	SNN1	SNN2	PLN	PBN	PSN	
WNN	0.76 * * *									
STN1	0.20	0.12								
STN2	0.30 *	0.20	0.66 * *							
SNN1	0.20	0	0.35 *	0.32 *						
SNN2	0.20	0.06	0.15	0.54 * * *	0.56 * * *					
PLN	0.42 * *	0.39 * *	0	0.01	0.02	0.01				
PBN	0.39 * *	0.28	0.07	0.17	0.38*	0.24	0.57 * * *			
PSN	0.53 * * *	0.22	0.04	0.23	0.36 *	0.36 *	0.34 *	0.62 * * *		
Altitude	-0.35*	-0.14	0	0	-0.24	-0.20	-0.31*	-0.41*	-0.65 * * *	
Slope	-0.01	0.16	0.28	0.16	-0.12	-0.17	-0.18	-0.27	-0.49 * * *	
Aspect	-0.19	-0.15	-0.19	0	-0.01	0.06	-0.12	-0.01	-0.26	

注:***表示 P<0.001; **表示 P<0.01; *表示 P<0.05; n=44。下同。

河岸带水体、土壤和植物中的磷具有一定的相关性,同时也响应海拔、坡度和坡向的变化(表 6)。 WTP与WDP、STP1与SAP1、STP2与SAP2、PLP与PBP及PBP与PSP均呈显著正相关,说明含磷物质在水体、土壤和植物不同营养器官中的迁移转化过程表现出较强的正向相关性。

同时,WTP 与 STP1、STP2、SAP1 和 SAP2 均 呈显著正相关(P < 0.001),WDP 与 SAP1 和 SAP2 均呈显著正相关(P<0.01),而水体与植物的磷相关性不显著(P>0.05),表明水体与土壤的磷相关性较高。土壤与植物间仅 SAP1 和 SAP2 与 PSP 呈显著正相关(P<0.05),说明土壤有效磷对植物茎竿磷含量有显著影响。此外,海拔与 WTP、STP1、STP2、SAP1、SAP2 和 PSP 均呈显著负相关,而坡度和坡向分别与 PSP 呈显著负相关(P<0.05),地形因素对植物茎竿磷含量的影响较大。

	表 6 尹溪河河岸市水体、工壤和恒物僻与地形的怕大分析										
指标	WTP	WDP	STP1	STP2	SAP1	SAP2	PLP	PBP	PSP		
WDP	0.50 * * *										
STP1	0.52 * * *	0.20									
STP2	0.57 * * *	0.25	0.95 * * *								
SAP1	0.69 * * *	0.45 * *	0.70 * * *	0.77 * * *							
SAP2	0.67 * * *	0.42 * *	0.67 * * *	0.75 * * *	0.96 * * *						
PLP	-0.12	-0.17	-0.11	-0.15	-0.14	-0.18					
PBP	0.19	0.14	0.21	0.16	0.18	0.16	0.52 * * *				
PSP	0.21	0.10	0.22	0.23	0.30 *	0.33 *	0.23	0.63 * * *			
Altitude	-0.32 *	-0.19	-0.56 * * *	-0.59 * * *	-0.49 * * *	-0.52 * * *	0.29	-0.20	-0.35 *		
Slope	-0.04	-0.15	-0.32*	-0.36 *	-0.18	-0.23	0.30 *	-0.07	-0.30 *		
Aspect	-0.25	0.07	-0.21	-0.24	-0.24	-0.27	-0.01	-0.08	-0.38 *		

表 6 笋溪河河岸带水体、土壤和植物磷与地形的相关分析

2.3 河岸带水体、土壤和植物氮磷含量与地形的冗余分析

依据河岸带水文过程,以 WTN、WNN、WTP 和 WDP 为响应变量,土壤和植物的氮磷含量及地形因 子为环境解释变量进行冗余分析(图 2),结果显示,2 个典范轴的解释比例分别为 89.39%和 7.23%,解释 了笋溪河河岸带水体氮磷变异的96.62%,较好地反 映土壤和植物中的氮磷及海拔、坡度和坡向对水体氮 磷的影响。其中,SAP1与 SAP2在 RDA1轴的投影 较长,十壤有效磷对水体的影响较大,海拔与坡度在 RDA2 轴的投影较长,对 RDA2 轴的贡献较大。 WTN 与 WNN 呈负相关, WTP 与 WDP 呈正相关, 且相关程度均较高,表明河岸带水体氮磷在与环境因 子的回归关系中,总氮与硝酸盐间相互约束,存在限 制行为,而总磷和可溶性磷酸盐相互促进,协同性较 好。此外, WTN 与 STN1、STN2、SNN1、SNN2、 PLN、PBN 和 PSN 均呈正相关,而 WNN 与 WTN 相 反,且二者均与 SNN1 和 SNN2 的相关程度较强,说 明水体总氮、土壤氮和植物氮同向积聚增大,水体 氮对土壤 硝态 氮 响 应 强 烈。 WTP 和 WDP 均 与 STP1、STP2、SAP1、SAP2、PBP 和 PSP 呈正相关,且 与 PBP 和 PSP 的相关程度较高,显示水体磷受植物 分枝磷和茎竿磷影响较大。WTN 和 WNN 对坡向的响 应强烈,其后依次为海拔、坡度,而 WTP 和 WDP 对 坡度的响应强烈,其次为海拔、坡向。

Monte Carlo 置换检验进一步说明环境因子对响应变量的影响(表 7)。土壤和植物中的氮磷与 3 个地形因子对水体氮磷变异的总可解释度为 64.91% $(R^2=0.419~7)$ 。置换检验显示,SNN1、STP1、STP2、SAP1和 SAP2 对水体氮磷含量的变异均具有显著的影响(P<0.05,P<0.01,P<0.05,P<0.001和 P<0.01),其中,SAP2 对水体氮磷含量特征变异的解释

度最大,为 25.11%,其后依次为 SAP1,STP2,STP1 和 SNN1,累计 69.14%。表明土壤氮磷是水体氮磷变异的 主导因素,且土壤磷的变异解释累计为 66.09%,对水环境的影响较大,与相关分析的结果一致(表 5)。此外,植物氮磷和地形因子对水体氮磷的变异也有一定解释力,但在置换检验中均未达到显著水平(P>0.05),其中植物氮的变异解释累计为 18.87%,水体与植物的磷相关性较强,与相关分析结果相同(表 6);海拔对水体氮磷的影响较大,为 8.09%。

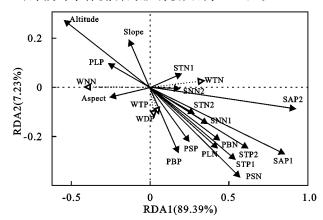


图 2 笋溪河河岸带水体氮磷与环境因子的冗余分析

3 讨论

3.1 河岸带水体、土壤和植物的氮磷状况

在自然降水、土地利用、径流侵蚀及人为活动的影响下,河岸带水体、土壤和植物中的氮磷含量各异。水体通常对陆源性氮磷具有稀释消解的作用,而植物从环境中吸收氮磷,因此笋溪河河岸带水体氮磷的含量依次小于土壤和植物,并呈现上游小、下游大的氮磷空间分布特征,这与前人[12,21]的研究结果相同。笋溪河水质由氮含量决定,这与三峡库区其他流域水体高氮低磷的研究结果一致[22-23]。河岸带水体氮以硝酸盐形态为主,而可溶性磷酸盐含量在总磷中占比近半,这与王宏等[23]在长江沱江流域的研究结果相同,与黄河水环

境的研究结果不同^[24]。同时,笋溪河河岸带土壤受流水作用和植物侵扰,氮磷含量相对贫乏,与李锐等^[25]江津区河岸带和库区其他河流河岸带土壤氮磷含量相近^[26]。河岸带竹林叶片氮磷的含量均值与四川盆地南麓的高山竹林叶片氮磷含量相近^[27]。

表 7 水体氮磷的冗余分析置换检验结果

因子	主	成分	置	置换检验		
囚丁	RDA1	RDA2	\overline{F}	Р	解释/%	
SAP2	0.721	1.487	7.665	0.006 * *	25.11	
SAP1	-0.171	-1.101	13.163	0.001 * * *	21.71	
STP2	0.332	-0.240	5.584	0.017 *	11.14	
PSN	-0.089	-0.062	0.229	0.819	9.16	
STP1	-0.427	-0.715	9.231	0.002 * *	8.13	
Altitude	0.181	-0.197	0.973	0.360	8.09	
PBN	0.124	0.180	0.024	0.992	5.07	
PLN	0.140	-0.677	0.028	0.993	4.64	
SNN1	0.117	-0.386	4.024	0.033 *	3.05	
STN2	0.263	-0.281	1.980	0.139	1.28	
PLP	-0.354	0.983	0.835	0.412	0.91	
Aspect	-0.011	-0.024	0.020	0.994	0.91	
PSP	0.060	0.068	0.038	0.977	0.85	
STN1	-0.148	1.161	2.320	0.120	0.42	
PBP	0	-0.422	0.618	0.478	0.03	
SNN2	-0.097	0.282	1.161	0.296	-0.02	
Slope	0.130	-0.073	0.201	0.826	-0.48	

注:n=44。

河岸带水体、土壤和植物中的氮磷含量受河流升降、径流冲刷和淹水状态变化的影响,在一个时期内表现出不同程度的变异性。重庆笋溪河流域受河流水文地理和三峡大坝调洪蓄水的影响,河岸带水体总磷的变异程度高于总氮,这与三峡库区部分河流氮磷变异特征相同[14,21]。随着河流区段下行,水体氮磷的变异均呈递减趋势,可能与下游河水流量相对充沛有关。河岸带上、下游土壤全氮的变异程度高于全磷,硝态氮的变异程度高于有效磷,同时受土层深度的影响,这与蔡雅梅等[28]河岸带土壤氮磷空间分布的部分研究结果一致。此外,水体和土壤中的氮磷变异高于植物氮磷,说明水体和土壤中的氮磷易受环境变化的影响,存在较高的流失风险,这与河岸带河水入渗土壤、氮磷在水体和土壤界面的吸附与交换有关。

3.2 河岸带水体、土壤和植物氮磷的影响因素

河岸带作为水陆生态系统的过渡带,水体、土壤和植物中的氮磷通过各圈层的物质循环,具有一定的相关性,同时受到海拔、坡度和坡向的影响。笋溪河河岸带水体和土壤中的氮磷通常具有多种形态,且同一介质中的不同氮磷形态往往具有较高的相关性,这与徐兵兵

等[29] 水体氮磷形态研究的结果相同。氮磷是农业面源 污染的限制性养分元素,其地球生物化学循环有所不 同[30-31]。河岸带水文作用强烈,从笋溪河上游到下 游,水体氮磷含量积聚增大;土壤受干湿交替和径流 冲刷,氮素通过硝化、反硝化作用及生物消耗,变化较 大,而主要来源于含磷矿物风化的磷,在与水体不断相 互作用中含量趋于一致;植物受营养过程和季节周期影 响,生长中不断从环境吸收氮磷营养物质,富集相对稳 定。因此,笋溪河河岸带水体与植物间的氮相关性高于 水体与土壤,而与土壤间的磷相关性高于植物,这与河 岸带植物和土壤对水文响应的结果相同[1,32],也与冗余 分析(图 2 和表 7)的结果相似。笋溪河流域地形因 子对河岸带水体、土壤和植物中氮磷的影响以负相关 为主。其中,海拔对河岸带水体总磷、土壤全磷和有 效磷均有显著影响,这可能是海拔对降水和温度具有 调控作用,进而促进土壤微生物对磷的分解、释放,再 通过地表径流和地下入渗与水体建立强相关。此外, 坡度对河岸带植物分枝氮磷均有显著影响,而坡向对 植物磷有显著影响,与坡度和坡向可以改变植物对光 照、水分和养分物质的需求,进而对植物的营养过程 产生限制作用的研究结果相同[33-34]。

河岸带水文变化是驱动水体、土壤和植物氮磷循 环的基础,水体氮磷的变化,反映了水体响应及适应 环境变化的能力。笋溪河河岸带各圈层氮磷的相关 分析(表 5 和表 6)与冗余分析结果相近。其中,水体 总氮与硝酸盐在相关分析时显著正相关,冗余分析时 负相关;而水体总磷和可溶性磷酸盐在响应环境变量 的2种分析中,结果表现相同,这与相关分析以统计 为主,而环境因素考虑较少,冗余分析内部多元线性 回归相互约束,考虑环境变量影响的方法有关。说明 生态系统内部存在多种相互作用的机制,水生态系统 的变化与水体氮磷总量及其形态组分高度相关[31,35],同 时受土壤氮磷、植物氮磷和地形因子的影响。这与蔡 雅梅等[28]在汾河河岸带氮磷的研究结果相似。基于 冗余分析整体, Monte Carlo 检验表明, 土壤氮磷是 众多环境因子中影响水体氮磷的主体(表 7),且土壤 硝态氮、全磷和有效磷的变异解释进一步表明对水体 氮磷的影响程度,这与前人^[36]对河岸带水体与土壤 氮磷物质的相关分析一致。检验显示,植物氮磷和地 形因子对引起水体氮磷变化的解释相对较小,且不显 著,与相关分析(表5和表6)近似。水体氮磷含量的 变化是众多环境因子共同作用的。本研究只涉及土 壤和植物氮磷及3个定量地形因子,后续研究需要将

更多的定性因子进行转化放入定量分析中。

4 结论

- (1) 笋溪河河岸带水体、土壤和植物的氮、磷含量受河流区段的影响均表现为上游小、下游大; 与地表水环境质量标准对比,水体呈高氮、低磷的含量特征,上游和中游属 IV 类水质,下游属劣 V 类水质,且水体氮以硝酸盐为主。应重点加强全河段氮污染物的削减和防控,并控制下游的陆源性氮输入。
- (2) 笋溪河河岸带水体、土壤和植物中的氮、磷彼此间存在一定的相关性,且对海拔响应强烈。同时,土壤氮磷、植物氮磷和地形因子对水体氮磷的影响程度依次变小($R^2 = 0.4197$),土壤氮磷是水体氮磷变异的主导因素。
- (3) 笋溪河河岸带水体氮磷对环境变量的响应存在较大差异。水体氮对植物氮的响应强烈,冗余分析置换检验中植物氮的总变异解释为 18.87%,其中植物茎竿氮的解释最高,为 9.16%;水体磷对土壤磷的响应强烈,土壤磷的总变异解释为 66.09%,且 20—40 cm 的土壤有效磷解释最大,为 25.11%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhang Z Y, Wan C Y, Zheng Z W, et al. Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir in China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013, 20(10); 7080-7091.
- [3] 虞慧怡,扈豪,曾贤刚.我国农业面源污染的时空分异研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(9):1-6.
- [4] 胡静锋.重庆市农业面源污染测算与空间特征解析[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(1):135-144.
- [5] Cottingham K L, Ewing H A, Greer M L, et al. Cyanobacteria as biological drivers of lake nitrogen and phosphorus cycling[J]. Ecosphere, 2015, 6(1); 1-19.
- [6] 高可伟,朱元荣,孙福红,等.我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J].湖泊科学,2021,33(5): 1400-1414.
- [7] Cai L H, Deng H Y, Wei H X, et al. Research framework and key issues for non-point source pollution in agriculture induced by water-loss and soil-erosion [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2480; 3855-3866.
- [8] 金晓丹,吴昊,陈志明,等.长江河口水库沉积物磷形态、 吸附和释放特性[J].环境科学,2015,36(2):448-456.
- [9] 李子,张艳芳.基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185.
- [10] Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, et al. Estimation

- of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2):209-215.
- [11] 陈雅如,肖文发.三峡库区土地利用与生态环境变化研究进展[J].生态科学,2017,36(6):213-221.
- [12] 郑永林,王海燕,王一格,等.三峡库区笋溪河流域面源 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.
- [13] 李明龙,贾梦丹,孙天成,等.三峡库区非点源污染氮磷 负荷时空变化及其来源解析[J].环境科学,2021,42 (4):1839-1846.
- [14] 李乐,刘常富.三峡库区面源污染研究进展[J].生态科学,2020,39(2):215-226.
- [15] 陈影,陈苏,马鸿岳,等.河流河岸带自然生境恢复评价研究进展[1].牛态科学,2021,40(4):223-228.
- [16] 中华人民共和国生态环境部.HJ 2.3—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.
- [17] 中华人民共和国生态环境部.HJ 964—2018 环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)[S].北京:中国科学出版社,2021:1-21.
- [18] 中华人民共和国生态环境部.HJ 710.1—2014 生物多样性观测技术导则 陆生维管植物[S].北京:中国科学出版社,2021:1-25.
- [19] 中华人民共和国生态环境部.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2021:1-3.
- [20] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(3):80-92.
- [21] 龚小杰,王晓锋,刘婷婷,等.流域场镇发展下三峡水库典型人库河流水体碳、氮、磷时空特征及富营养化评价[J].湖泊科学,2020,32(1):111-123.
- [22] Zhu B, Wang Z H, Wang T, et al. Non-point-source nitrogen and phosphorus loadings from a small water-shed in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1):10-15.
- [23] 王宏,徐娅玲,张奇,等.沱江流域典型农业小流域氮和 磷排放特征[J].环境科学,2020,41(10);4547-4554.
- [24] 李家科,彭凯,郝改瑞,等.黄河流域非点源污染负荷定量 化与控制研究进展[J].水资源保护,2021,37(1):90-102.
- [25] 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.
- [26] Qu H Y, Jia G M, Liu X, et al. Soil extracellular enzymatic stoichiometry along a hydrologic gradient of hillslope riparian zone off Three Gorges Reservoir[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(5): 1575-1584.

291

- sis temperature series[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016,52(6):749-761.
- [23] Ye R Z, Horwath W R. Influence of rice straw on priming of soil C for dissolved organic C and CH₄ production[J].Plant and Soil,2017(1/2),417:231-241.
- [24] Zhu E X, Liu T, Zhou L, et al. Leaching of organic carbon from grassland soils under anaerobiosis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 141; e107684.
- [25] 杨绒,严德翼,周建斌,等.黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性[J].生态学报,2007,27(4):1397-1403.
- [26] 罗煜,赵小蓉,李贵桐,等.生物质炭对不同 pH 值土壤 矿质氮含量的影响[J].农业工程学报,2014,30(19): 166-173.
- [27] Zhu L X, Xiao Q, Shen Y F, et al. Effects of biochar and maize straw on the short-term carbon and nitrogen dynamics in a cultivated silty loam in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 1019-1029.
- [28] 汤宏,沈健林,刘杰云,等.秸秆的不同组分对水稻土微生物量碳氮及可溶性有机碳氮的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):264-271.
- [29] 芮绍云,袁颖红,周际海,等.改良剂对旱地红壤微生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):260-265.
- [30] 陈安强,付斌,鲁耀,等.有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J].农业工程学报,2015,31(21):160-167.
- [31] Ouyang L, Wang F, Tang J, et al. Effects of biochar

- amendment on soil aggregates and hydraulic properties [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(4):991-1002.
- [32] 高洁,江韬,李璐璐,等.三峡库区消落带土壤中溶解性 有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J].环境科学, 2015,36(1):151-162.
- [33] 余旭芳,周俊,任兰天,等.小麦秸秆堆肥水溶性有机物的结构和组成演变[J].光谱学与光谱分析,2021,41(4):1199-1204.
- [34] 李彬彬,武兰芳,许艳艳,等.秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与 CO_2 排放的关系[J].农业环境科学学报,2017,36(12):2535-2543.
- [35] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等.不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤腐殖物质组成及性质的影响[J].环境科学,2017,38(2):769-782.
- [36] 范春辉,张颖超,王家宏,pH 值对秸秆腐殖化溶解性有机质紫外光谱和荧光光谱的影响[J].光谱学与光谱分析,2015,35(7):1933-1937.
- [37] Michel K, Matzner E, Dignac MF, et al. Properties of dissolved organic matter related to soil organic matter quality and nitrogen additions in Norway spruce forest floors[J]. Geoderma, 2006, 130(3/4):250-264.
- [38] 狄丽燕,孔范龙,王森,等.胶州湾滨海湿地凋落物分解对土壤有机碳矿化的影响[J].生态学报,2019,39(22):8483-8493.
- [39] 刘翥,杨玉盛,朱锦懋,等.中亚热带森林转换对土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响[J].生态学报,2015,35(19):6288-6297.

(上接第 282 页)

- [27] 刘雄,向玲,赵丹蕊,等.不同海拔金佛山方竹叶片氮磷 化学计量特征及影响因素[J/OL].应用与环境生物学 报:1-11[2021-09-09].https://doi.org/10.19675/j.cnki. 1006-687x.2021.02054.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 于贵瑞,高扬,王秋凤,等.陆地生态系统碳氮水循环的 关键耦合过程及其生物调控机制探讨[J].中国生态农 业学报,2013,21(1):1-13.
- [31] 周强,姜允斌,郝记华,等.磷的生物地球化学循环研究 进展[J].高校地质学报,2021,27(2):183-199.

- [32] 钱进,沈蒙蒙,王沛芳,等.河岸带土壤磷素空间分布及其对水文过程响应[J].水科学进展,2017,28(1):41-48.
- [33] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.
- [34] 李文政,刘目兴,易军,等.三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J].水土保持学报,2021,35(3):135-142.
- [35] 叶宏萌,杨浩,袁旭音,等.基于流域沉积物氮磷形态的 生态风险评价:以沙溪流域为例[J].环境化学,2020,39 (12):3471-3479.
- [36] Chen Z T, Arif M, Wang C Y, et al. Effects of hydrological regime on foliar decomposition and nutrient release in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J].Frontiers in Plant Science, 2021, 12; e661865.