

雅砻江—安宁河并流段水沙及养分空间差异分析

庞海熔¹, 张志昊¹, 刘承邦¹, 敬佩¹, 程家园², 叶志鑫¹, 梁心蓝¹

(1.四川农业大学水利水电学院,四川雅安625014;2.四川农业大学机电学院,四川雅安625014)

摘要: 为了解人类活动影响下的流域泥沙及养分分布情况,以雅砻江及其一级支流安宁河为研究对象,选择雅砻江—安宁河并流段为研究区,沿河流纵向选取6个断面,并对断面垂向与横向进行含沙量及氮磷浓度的监测,分析不同流域水沙沿程变化及养分空间分布特征。结果表明:(1)安宁河含沙量整体大于雅砻江并流段,2条河流中下游的含沙量均大于上游,总体沿程增加。在泥沙断面垂向分布上,雅砻江无明显分层现象;安宁河分层现象明显,表现出底层>表层>中层的规律。在泥沙断面横向分布上,除安宁河中下游为左侧分布外,安宁河上游及雅砻江并流段均表现为右侧分布。雅砻江并流段泥沙断面均匀性总体优于安宁河。(2)雅砻江TN、TP整体均显著小于安宁河流域,且雅砻江—安宁河并流段氮磷空间分布在断面垂向和断面横向上均存在显著差异。(3)雅砻江并流段TN、TP浓度与含沙量呈线性正相关,其中断面横向拟合度优于断面垂向,且TN与含沙量的相关性高于TP;而安宁河则是断面垂向拟合度大于断面横向,TP与含沙量的相关性高于TN。

关键词: 雅砻江—安宁河并流段;含沙量;氮磷;空间分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0016-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.003

Spatial Differences of Water, Sediment and Nutrients in the Parallel Section of Yalong-Anning River

PANG Hairong¹, ZHANG Zhihao¹, LIU Chengbang¹, JING Pei¹,

CHENG Jiayuan², YE Zhixin¹, LIANG Xinlan¹

(1.School of Water Resources and Hydropower, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014;

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

Abstract: In order to understand the spatial distribution of sediment and nutrient under the impact of human activities, taking Yalong River and its first tributary Anning River as the research object, selecting the parallel section of Yalong -Anning River as the research area, six across sections along the river were selected, and the sediment concentration, nitrogen and phosphorus concentration were monitored vertically and transversely. The variation of sediment and spatial distribution characteristics of nutrient in different basins along the way were analyzed. The results showed that: (1) The sediment concentration of the Anning River was greater than that of the Yalong River, and the sediment concentration of the middle and lower reaches of these two rivers was higher than that of the upper reaches, and increased along the river. In the vertical distribution of sediment sections, there was no obvious stratification in Yalong River, while the stratification phenomenon of Anning River was remarkable, and the sediment concentration followed the order of bottom> surface>middle layer. In the transverse distribution of sediment section, except the middle and lower reaches of Anning River, the Yalong River and the upper reaches of the Anning River showed the right edge distribution. Generally, sediment uniformity of the cross section of Yalong River was better than that of Anning River. (2) TN and TP of Yalong River were significantly less than those of Anning River basin, and there were significant differences in spatial distribution of TN and TP of the parallel section of Yalong-Anning River in both vertical and horizontal sections. (3) There was a positive linear correlation between the concentrations of TN and TP and sediment in the parallel section of Yalong River. The fitting degree of transverse

收稿日期:2021-09-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41601292);四川省教育厅项目(15ZB0007);四川农业大学社科研究专项重点项目(2018ZD01)

第一作者:庞海熔(2000—),女,本科生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:1660618144@qq.com

通信作者:梁心蓝(1983—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要从事土壤水力侵蚀研究。E-mail:liangxinlan@sicau.edu.cn

section was better than that of vertical section, and the correlativity between TN concentration and sediment was higher than TP. While for Anning River, the fitting degree of vertical section was better than that of transverse section, and the correlativity between TP concentration and sediment was higher than that TN.

Keywords: parallel section of Yalong-Anning River; sediment concentration; nitrogen and phosphorus; spatial distribution

流域水沙问题是目前研究流域水土保持、径流特征、水文水质的关键问题之一^[1]。但河流水沙的形成和演化,是一个受众多因素影响的综合过程^[2]。长期以来,国内外学者^[3-4]对河流泥沙含量变化特征及影响因素开展了广泛研究,降水量、气候变化等自然因素对河流含沙量分布的影响弱于植被覆盖、土地利用及人类活动等因素的影响。

连运涛等^[5]关于流域水沙输移趋势及水土流失综合治理等研究表明,水土流失是流域含沙量增加的重要原因。在农业方面,流域水沙变化使得养分与污染物在河流水体中的输移发生相应的变化。地表径流易使农业生产活动中的氮、磷元素等营养物质进入附近河流水体,从而造成严重生态问题^[6]。在长江及沱江流域,卓海华等^[7]研究表明,氮磷易溶于水、易吸附于悬浮泥沙并进行长途迁移,且其时空分布主要受到区域内城镇化水平等因素的影响。因此,针对水体泥沙变化及氮磷时空分布特征的研究具有重要意义。

Batista 等^[8]对巴西格兰德河上游土壤流失和产沙的空间分布进行了研究,模拟了格兰德河流域土壤流失和产沙情况,对流向该盆地 2 个主要水库的泥沙量进行了量化;Zak 等^[9]研究了综合缓冲区对农业径流氮磷去除的影响认为,综合缓冲区是一种有价值的改良干缓冲带,能减轻农田高养分负荷对水环境的不利影响。目前,国内流域内水沙沿程分析和氮磷时空变化分析的研究主要集中在黄河流域^[10]和其他湖泊河流^[11],且对于含沙量与养分空间分布的相关性研究较少。

雅砻江流域面积约 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于青藏高原东部,流域内地形地势变化悬殊。安宁河发源于四川省冕宁县北部,是雅砻江最大的支流^[12],其所在区域属于河谷地貌,以宽谷为主,水环境情况复杂。安宁河谷内人口众多,是凉山彝族自治州最重要的农业区和核心区域^[13],人类活动对河流生态系统产生了很大影响^[14]。随着安宁河谷内城市化进程的不断加快,其工农业活动也逐渐频繁,导致流域内部水体、水质特征随之产生显著变化,进而使得雅砻江—安宁河并流段泥沙含量、氮磷元素含量产生明显的空间变化特征。并列于牦牛山水平最小距离 18 km 处的雅砻江并流段,工农业进程也逐步推进,空间水平距离较

小区域内气候、地质、地形特征等应无显著差异^[15],但实际情况显示,安宁河与雅砻江并流段的水文泥沙情势及养分特征分布截然不同。针对雅砻江—安宁河并流段水沙及养分空间分布及其变化特征对人类活动的响应机制尚未展开研究。

鉴于此,本研究以雅砻江—安宁河并流段为研究对象,通过对河流样品现场收集和试验测定,结合泥沙及水文特点,分析雅砻江—安宁河并流段水体含沙量、氮磷等指标的空间分布特征,从人类活动对泥沙含量、氮磷元素含量作用的角度,探讨影响雅砻江—安宁河并流段泥沙及养分空间分布差异的主要因素,以期对雅砻江—安宁河并流段河流水资源的综合治理提出科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅砻江发源于巴颜喀拉山南麓,于攀枝花市汇入金沙江,干流全长 1 571 km^[16],其中棉沙镇至桐子林站段(101°51′—101°85′E,26°43′—28°20′N)与其最大支流安宁河并行南下。研究区海拔 987.5~1 437.5 m,气候属亚热带半干旱季风气候,多年平均气温 20.3 ℃。流域主要土壤类型为草地、耕地、水域、沼泽,主要有常绿林、灌木林、落叶林等植被。

安宁河位于四川省西昌市境内(101°51′—102°48′E,26°38′—28°53′N),是雅砻江的最大支流,发源于冕宁县东小相岭记牌山,流经冕宁、西昌、德昌 3 个县市,于米易县得石镇(盐边县桐子林水电站)汇入雅砻江,流域面积 11 150 km²,干流长度约为 303 km,海拔 992~4 750 m,属于典型羽状水系^[13]。安宁河流域属于亚热带季风气候,年均气温 16~17 ℃,年降水量在 1 000 mm 以上^[17],多年平均流量为 41.5 m³/s(安宁河水文站),是四川西南部多沙河流,多年平均含沙量为 1.41 kg/m³,而雅砻江干流含沙量较少^[18]。

1.2 断面设置及样品采集

综合考虑研究区水文特征,结合城镇分布和河道特征等因素,在雅砻江—安宁河并流段依次从上游至下游沿河段(各河段分别为雅砻江棉沙镇至金沙镇段,雅砻江金沙镇至桐子林站段,雅砻江桐子林站至下游段,安宁河老堡子至安宁河大桥段,安宁河大桥至桐子林站段,安宁河桐子林站至下游段)选取棉沙镇、金河镇、桐子林(雅砻江)段、老堡子、安宁河大桥和桐子林(安宁

河)段共 6 个采样断面(图 1)进行取样。沿每一断面横向从左至右设置 3 条垂线,每条垂线沿断面纵向从上至下设置 3 个采样点,共 9 个采样点,每个采样点取 3 个重复样。用深水采样器进行分层采集水样。

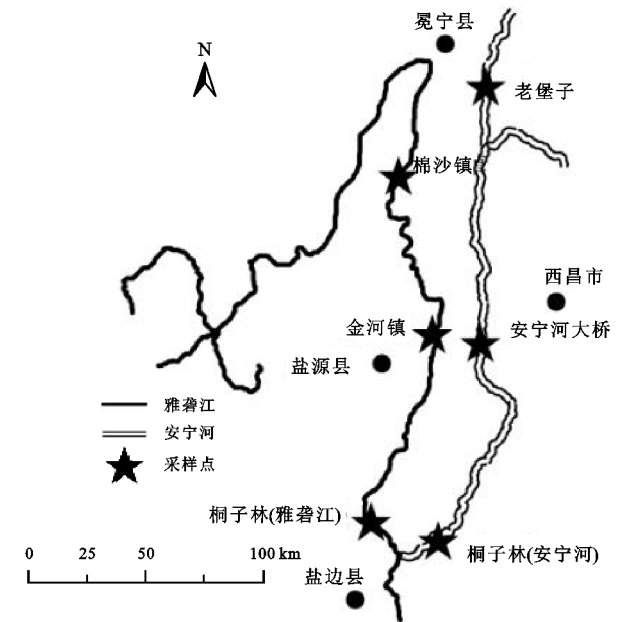


图 1 雅砻江—安宁河并流段监测断面

于 2020 年 10 月对雅砻江—安宁河并流段进行样品采集,采样断面坐标见表 1。每个断面分别选取表层、中层和底层,每层取左、中、右 3 个测点进行采样,每个断面共 9 个采样点,每个采样点采取水样 1 000 mL,装入采样瓶中密封并带回实验室进行分析。将水样静置 24 h,提取上层清液进行水体养份分析,并对下层泥沙进行烘干、称重、记录数据^[19]。

1.3 样品检测及测定

水样静置 24 h 后,滤去上层清液,放入烘箱,在 105 ℃条件下,烘干 24 h 以上,得到单位体积浑水内所含干沙的质量即含沙量 $S^{[20]}$,计算公式为:

$$M_2=M_1-M_{\text{水}}=M_1-V_{\text{水}}\cdot\rho_{\text{水}}=M_1-(V-V_1)\quad(1)$$

表 2 雅砻江—安宁河并流段监测环境参数

采样断面	采样时间(年-月-日)	流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	气温/℃	天气	风向
棉沙镇	2020-10-07	1.04±0.26	12.48±3.31	20	阴	NE—2
金河镇	2020-10-06	0.59±0.11	2.58±1.62	20	小雨	S—2
桐子林(雅砻江)	2020-10-06	1.15±0.46	18.01±3.83	21	阴	SE—1
老堡子	2020-10-08	0.65±0.16	1.18±0.60	16	小雨	SE—1
安宁河大桥	2020-10-07	1.03±0.64	3.22±1.75	19	阴	N—1
桐子林(安宁河)	2020-10-06	1.14±0.51	7.98±2.33	23	阴	SE—1

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.1.2 泥沙空间分布特征 2020 年 10 月 4—8 日雅砻江—安宁河并流段从上游至下游 6 个断面处含沙量情况见表 3。将棉沙镇至桐子林站段各河段分别记为雅砻江并流段上、中、下游,老堡子至桐子林站段各河段分别记为安宁河上、中、下游。雅砻江并流段

$$\rho_{\text{水}}=M_1-V\cdot\rho_{\text{水}}+\frac{M_2}{d}\quad(2)$$

$$M_2=\frac{(M_1-V\cdot\rho_{\text{水}})\cdot d}{d-1}\quad(3)$$

$$S=\frac{(M_1-V\cdot\rho_{\text{水}})\cdot d}{(d-1)\cdot d}\quad(4)$$

式中: $\rho_{\text{水}}$ 为清水密度(kg/m³),本文中为 1.0×10³ kg/m³; d 为标准泥沙比重(kg/m³),为 2.65×10³ kg/m³; V 为水沙混合样品体积(cm³); V_1 为沙体积(cm³)。

表 1 水样采样断面坐标

编号	采样断面	地理坐标	海拔/m
1	棉沙镇	101°85′21″E,28°20′93″N	1437.47
2	金河镇	101°56′18″E,27°43′10″N	1175.50
3	桐子林(雅砻江)	101°51′06″E,26°43′14″N	987.55
4	老堡子	102°11′18″E,28°36′50″N	1805.69
5	安宁河大桥	102°10′45″E,27°44′46″N	1468.58
6	桐子林(安宁河)	101°51′45″E,26°43′02″N	989.78

为进一步分析雅砻江—安宁河并流段水体中总氮(TN)、总磷(TP)浓度空间分布的差异,对水样品进行了总氮、总磷检测。TN、TP 采用分光光度法^[21-22]检测。

1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 22.0 和 Excel 2019 软件进行整理、统计和分析,采用 Excel 2019 和 Origin 9.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水文特征差异性分析

2.1.1 雅砻江—安宁河并流段环境参数 雅砻江—安宁河并流段的环境参数见表 2。沿河流“上游—中游—下游”纵向梯度,同一时段内雅砻江的流速、水深、气温均无明显相关变化;安宁河从上游至下游流速、水深和气温均呈上升趋势。

含沙量从上游至下游逐渐增加,安宁河中游含沙量最大,下游次之,上游含沙量最小。安宁河总体含沙量远大于雅砻江并流段,其中上游差异较小,中下游差异较大。安宁河中下游含沙量处于较高水平,且显著大于雅砻江并流段中下游的含沙量,安宁河中游含沙

量最大,约为上游的 15 倍,下游含沙量约为上游的 9 倍。由此可见,2 条河流含沙量均呈现出中下游大于上游的趋势。

表 3 雅砻江—安宁河并流段含沙量分布

采样河段	单位:kg/m ³	
	最大含沙量	平均含沙量
雅砻江上段	0.008	0.004±0.001
雅砻江中段	0.018	0.012±0.005
雅砻江下段	0.050	0.020±0.011
安宁河上段	0.100	0.020±0.007
安宁河中段	0.730	0.300±0.029
安宁河下段	0.640	0.180±0.013

雅砻江—安宁河并流段含沙量呈现上述沿程变化规律。一方面,由于河道特征引起的水流条件不同而导致含沙量不同,雅砻江河谷呈“V”形,岸坡稳定,河道下切至岩层,河床已基本抵达侵蚀基准面,且两岸多为坚硬岩石,整个河段含沙量较低;而安宁河河谷呈“U”形,岸坡稳定性较差,两岸多为土壤层,河床位于侵蚀基准面以上,受冲刷较严重,且在中游河段出现明显淤积,为下游提供了泥沙来源,导致安宁河中、下游含沙量较高;另一方面,人类活动如工农业发展、城镇分布等人为因素的不同导致不同河流含沙量呈现显著差异,雅砻江棉沙镇至桐子林站段人口密度较小,人类活动不频繁,对自然环境扰动较少,植被覆盖较高,蓄水保土能力较强,而安宁河老堡子至桐子林站段人口密度较大,农业耕作活动频繁,城镇化较高,人类对自然环境的扰动较大,植被覆盖相对较低,土壤侵蚀严重,安宁河流域含沙量显著高于雅砻江并流段。可见,自然因素与人类活动共同作用的不同影响会导致区域不同河流的含沙量呈现不同的沿程变化趋势。

具体到各河段,雅砻江并流段上、中、下游最大含沙量分别为平均含沙量的 2.0,1.5,2.5 倍,而同时期安宁河上、中、下游的最大含沙量则为平均含沙量的 5.0,2.4,3.6 倍。可知,雅砻江由于含沙量较小,所以各测点含沙量波动不大,而安宁河含沙量约为雅砻江并流段含沙量的 5~14 倍,其数值相对较大,各测点含沙量波动也较大。

2.1.3 河流泥沙断面均匀性 河流的泥沙断面均匀性能反映其水沙条件、流速、流态、植被覆盖、人类活动等因素对河流泥沙的影响。本文从断面垂向和横向 2 个方面来分析雅砻江—安宁河并流段的泥沙断面均匀性。

由图 2 可知,雅砻江并流段与安宁河存在显著差异。雅砻江断面垂向表、中、底层含沙量均远小于安宁河,雅砻江泥沙断面分层现象不明显,中层和底层

含沙量略大于表层,安宁河具有非常明显的泥沙断面分层现象,上、中、下游含沙量均呈现出底层>表层>中层的规律,其中下游各层泥沙分布差异最大,其极差为 0.21 kg/m³,中游次之,其极差为 0.13 kg/m³,上游最小,其极差为 0.035 kg/m³。2 条河流在泥沙断面分层现象上呈现如此大的差异,究其原因雅砻江并流段植被覆盖度较高,河岸蓄水保土能力较好,两侧山体多为坚硬岩石,泥沙源较少,河水冲刷作用趋于平衡。因此,即使在雅砻江河谷呈“V”形且下切较深,水流流速较大的情况下,由于水体含沙量总体居于极低水平,其断面含沙量仍未表现出明显的分层现象。安宁河上游河岸多为紫色土和水稻土,有一定的侵蚀现象,但河道纵比降较小,水流流速小于雅砻江并流段,所以泥沙断面分层情况与雅砻江并流段上游接近,不甚明显。但安宁河中下游由于河谷呈“U”形,两侧河岸多为宽谷,有冲积锥、洪积扇及河流阶地,河槽宽而浅,河中有沙洲、心滩,水流分散,岸坡不稳^[18],因此,在中游流速大于雅砻江并流段,下游流速与雅砻江并流段下游流速接近的情况下,其泥沙断面分层现象均较为显著。

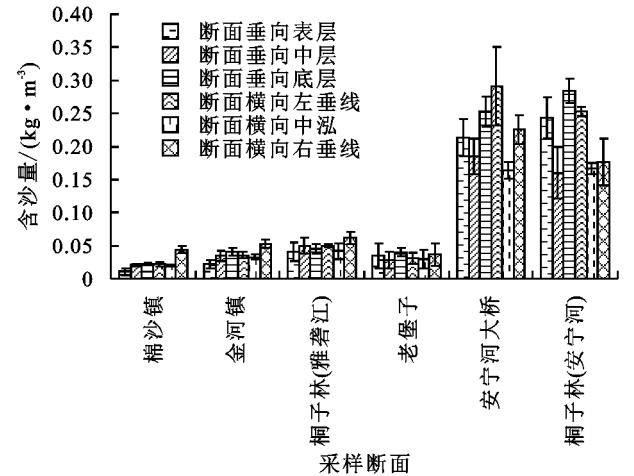


图 2 观察期内雅砻江—安宁河并流段主要控制断面上垂向和横向含沙量

由图 2 可知,雅砻江并流段上、中、下游及安宁河上游均表现出相同的典型右侧分布现象,即中泓<左垂线<右垂线,雅砻江并流段上、中、下游右垂线含沙量分别为中泓的 220%,160.6%,147.6%。雅砻江并流段上、中、下游的监测断面均处在顺直河道区域,各断面左垂线、中泓、右垂线水流流速、挟沙能力及冲淤情况均无显著差异,但在实地观测中,右岸仍存有少量薄层土壤,而左岸为坚硬岩石,使得右岸泥沙源大于左岸,泥沙随径流汇入河道,右垂线含沙量明显大于中泓及左垂线。安宁河上游右垂线含沙量为中泓的 123.3%,可能是安宁河上游测量断面所处位置为一河流弯道处,转弯角度约 45°,右侧为凹岸,水流流

速较大,挟沙能力较强,右垂线悬移质含量最大。

安宁河中下游含沙量断面横向分布特征与上游及雅砻江并流段相反,为典型左侧分布现象,即中泓<右垂线<左垂线。由于安宁河自中游至下游,干流左岸人口分布密集,耕地面积较大,土壤侵蚀严重。安宁河中下游沿程接纳自左岸汇入的支流数量大于自右岸汇入的支流数量,且自左岸汇入的支流如孙水河、海河等沿岸多为河谷平原,受人类活动影响较大,泥沙含量较大,而自右岸汇入的支流如茨达河属于高山峡谷型河流,与雅砻江相似,其含沙量较小。因此,安宁河中下游泥沙断面横向分布才会呈现出明显的左侧分布现象。

综上,雅砻江并流段为高山峡谷型,受人类活动影响较小,而安宁河为平原河谷型,受人类活动影响较大,侵蚀严重,无论是断面垂向还是断面横向,雅砻江并流段泥沙断面均匀性均优于安宁河。

此外,从河流断面含沙量的标准差(表 4)来看,雅砻江并流段的标准差总体上小于安宁河,其各断面含沙量分布的离散程度小于安宁河,进一步说明雅砻江并流段泥沙断面均匀性较好,而安宁河泥沙断面均匀性较差。原因是雅砻江并流段河道两岸为坚硬岩体,受雨水冲刷与河水冲刷效应较小,水体受下泄水流“搅动”“干扰”作用小,各测点与各垂线间差异也较小。安宁河各测段可明显观察到泥沙垂向分层和横向侧向分布的特征,下游为河谷城镇,属人群高度集中区域,且多分布冲刷平原与江心洲,河水受人类影响、河水自然下泄、冲刷作用较大,因此,安宁河含沙量在各测点与垂线间差异显著。河流泥沙断面均匀性总体变化特征为沿纵向梯度下游大于上游、断面垂向底层大于表层、断面横向沿岸大于中泓。

表 4 观察期内雅砻江—安宁河并流段断面含沙量标准差

采样断面	断面垂向			断面横向		
	表	中	底	左	中	右
棉沙镇	0.001	0.002	0.005	0.004	0.001	0.005
金河镇	0.005	0.008	0.006	0.005	0.004	0.006
桐子林(雅砻江)	0.007	0.012	0.014	0.002	0.012	0.009
老堡子	0.006	0.013	0.019	0.009	0.014	0.017
安宁河大桥	0.022	0.027	0.028	0.059	0.013	0.022
桐子林(安宁河)	0.018	0.039	0.031	0.007	0.008	0.035

2.2 雅砻江—安宁河并流段 TN、TP 浓度分布特征

2.2.1 雅砻江—安宁河并流段 TN、TP 空间分布

由图 3 可知,雅砻江并流段从上游至下游断面垂向 TN、TP 浓度极差分别为 0.408,0.049 mg/L,平均浓度分别为 1.109,0.102 mg/L,安宁河从上游至下游断面垂向 TN、TP 浓度极差分别为 0.845,0.035 mg/L,平均浓度分别为 3.124,0.228 mg/L。

雅砻江并流段 TN、TP 浓度均呈现明显的垂向

分层现象,上中下游 TN 浓度均表现为底层>表层>中层。TP 则表现为表层、中层、底层浓度依次增大的趋势。安宁河 TN、TP 浓度总体也呈现出一定的垂向分层现象,上下游 TN 表现为表层、中层、底层浓度依次增大的趋势,中游 TN 浓度表现为底层>表层>中层,上中下游 TP 浓度表现为底层>表层>中层。

雅砻江并流段与安宁河的 TN、TP 浓度在断面垂向上呈现出不同的分层现象,说明 2 个流域的 TN、TP 垂向分布有所差异。首先,安宁河全流域 TN、TP 浓度均显著大于雅砻江并流段,说明人类的生产生活排放了大量的 N 和 P,并随着径流汇入河道。其次,2 个流域的 TN 浓度垂向分布与 TP 呈现截然相反的趋势,说明这 2 个流域 N 和 P 的使用程度不同,雅砻江并流段人烟稀少,水体养分情况接近于天然,即底层 N、P 浓度大于表层和中层,这是由于水体养分随着水深及沉积物深度的增加而增加。安宁河沿岸工农业发达,城镇化程度高,虽然 N 和 P 浓度的总体趋势是随水深及沉积物深度的增加而增加,但在中游断面表层 TN 浓度大于中层,是由于该断面位于城市中心,接收城市径流、工农业废水及生活污水较多,其表层 TN 浓度反而大于中层。

由图 3 可知,雅砻江并流段从上游至下游断面横向 TN、TP 浓度极差分别为 0.433,0.006 mg/L,平均浓度分别为 1.060,0.086 mg/L;安宁河从上游至下游断面横向 TN、TP 浓度极差分别为 0.965,0.058 mg/L,平均浓度分别为 2.735,0.221 mg/L。

雅砻江并流段 TN、TP 浓度均呈现明显的侧向分布现象,雅砻江并流段上中下游的 TN、上中游 TP 均表现为右垂线>左垂线>中泓,而雅砻江并流段下游则表现为左垂线>右垂线>中泓。安宁河全段 TN、TP 浓度侧向分布也呈现相同规律,即全流域 TN 和上中游 TP 浓度均为右垂线最大,左垂线居中,中泓最小,但下游 TP 浓度情况相反,左垂线大于右垂线。

养分的横向分布方面,雅砻江并流段与安宁河 TN、TP 浓度分布呈现相同规律,且与水体含沙量的横向分布规律基本一致。可见,作为载体,径流与河流泥沙的横向分布规律能直接影响水体养分的横向分布特征。

综上,雅砻江并流段 TN、TP 浓度在断面垂向和断面横向分布上波动较为平稳,沿程变化不大,主要是因为山区水体的自净能力及上游布设的二滩水利工程对磷素的吸附作用较显著。而安宁河由于地处平原河谷,耕地面积远大于雅砻江并流段,周围人类活动频繁,氮素、磷素排放较多,其 TN、TP 浓度在断面垂向和断面横向分布上波动剧烈,沿程变化较大。

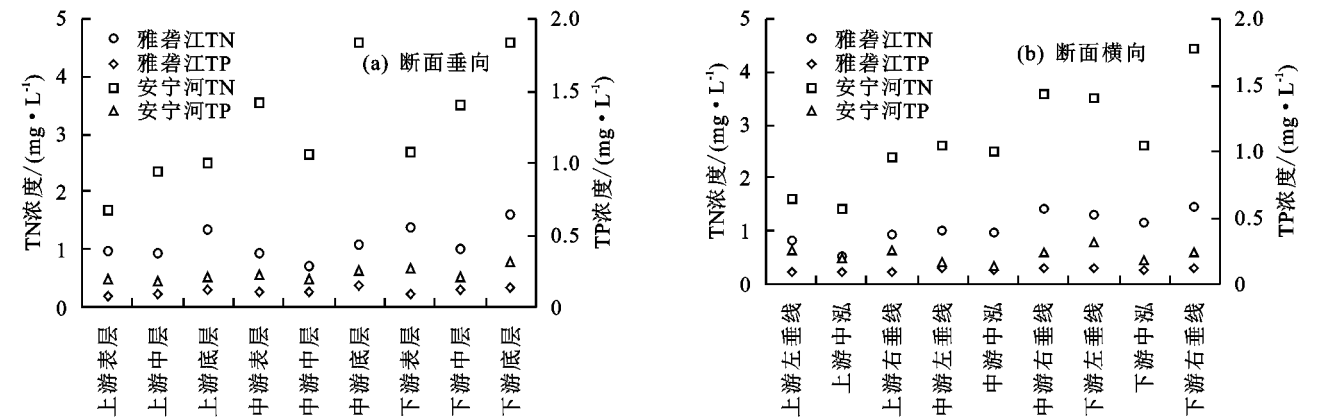


图 3 雅砻江—安宁河并流段水体 TN、TP 浓度断面垂向—横向分布

2.2.2 雅砻江、安宁河及其他河流 TN、TP 浓度变化范围 据实际测量资料统计,雅砻江并流段 TN 和 TP 浓度变化范围分别为 0.512~1.638,0.021~0.164 mg/L,平均浓度分别为 0.828,0.093 mg/L。安宁河从上游至下游 TN 和 TP 浓度分别为 0.629~3.638,0.136~0.473 mg/L,平均浓度分别为 2.035,0.204 mg/L。安宁河 TN 浓度远超过地表水Ⅲ类水质浓度限值^[23]。

雅砻江—安宁河并流段的 TN、TP 浓度变化范围与国内其他主要河流情况基本相似。韩谓等^[24]对黄河氮磷负荷时空分布的研究表明,黄河干流从源区至河口养分浓度整体呈逐渐上升的趋势,TN、TP 浓度变化范围分别为 0~6,0~2 mg/L。杨盼等^[25]对长江干流氮、磷浓度变化趋势的分析表明,在长江干流中沿程 TP 浓度变化为 0.10~0.14 mg/L,且各断面 TP 浓度都较高,呈沿程上升趋势,受人类活动影响较大。雅砻江并流段 TN 浓度明显低于黄河与长江干流,而 TP 浓度远低于黄河,与长江干流接近,安宁河 TN 浓度低于黄河,与长江干流接近,而 TP 浓度低于黄河又高于长江干流。

2.2.3 水体含沙量与 TN、TP 浓度的关系 泥沙是水体中污染物的主要载体之一,绝大多数污染物在水体

中的输移与泥沙运动密切相关^[25]。因此,分析 TN、TP 浓度与含沙量关系对于揭示泥沙对水环境的影响及水环境对泥沙作用的响应机制具有重要意义。

由图 4 可知,雅砻江—安宁河并流段 TN、TP 浓度均随含沙量的增大而增大,且 TN 的增大幅度明显大于 TP。雅砻江各断面 TN、TP 浓度均与含沙量呈线性正相关,且断面横向的拟合度明显大于断面垂向,断面横向 TN、TP 回归方程的决定系数分别为 0.879 7和 0.541 1,表明 TN 与含沙量的相关性高于 TP。安宁河各断面除断面横向的 TP 外,其余均与含沙量呈正相关,与雅砻江相反,安宁河断面垂向拟合度大于断面横向。断面垂向 TN、TP 回归方程的决定系数分别为 0.633 3 和 0.643 1,TP 与含沙量的相关性略高于 TN。水体中的 TN、TP 等养分浓度的变化是多种因素共同作用的结果,雅砻江—安宁河并流段TN、TP 浓度与含沙量关系的差异主要是人类活动造成的,雅砻江从上游至下游未存在频繁农业活动与人类活动,其含沙量虽逐渐增大但 TN、TP 浓度呈现较稳定的波动,而在安宁河流域中一下游河段含沙量大量增加,TN、TP 浓度呈大幅度增加趋势,中下游城镇生活污染大,工农业生产高度发展,受养分污染干扰更大。

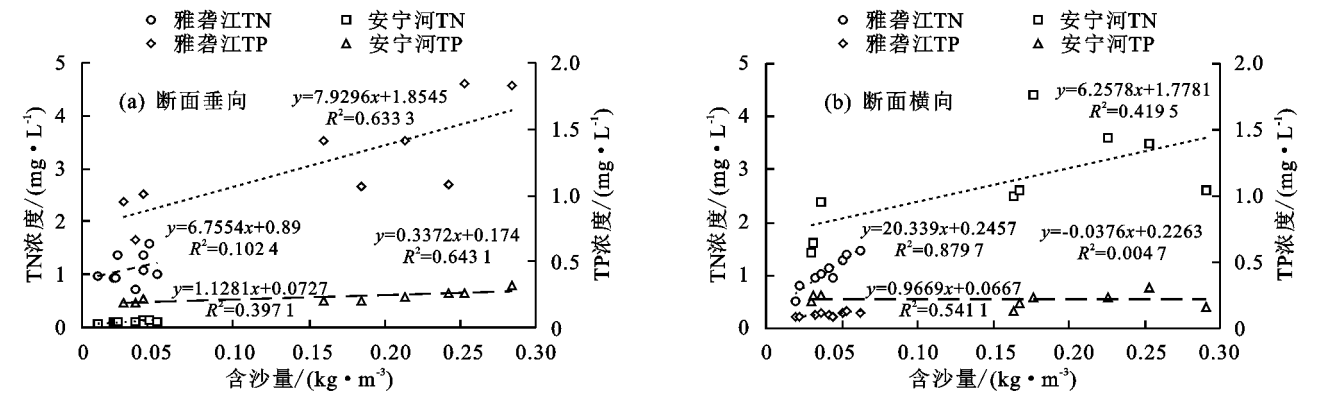


图 4 雅砻江—安宁河并流段断面 TN、TP 浓度与含沙量的关系

3 讨论

本研究中,在纵向上,同一河流含沙量沿程逐渐

增加;在横向上,支流泥沙变化强度大于干流泥沙变化强度。雅砻江—安宁河并流段河道比降较大区域

水流流速快,这与何灼伦^[26]的研究结果相似。河流泥沙的产生与输移受河势变化、水流流速等影响,在不同河段,断面泥沙的垂向和横向分布均有所不同。黎铮^[27]模拟了不同水动力条件下的泥沙浓度垂向分布情况得出,悬沙浓度随水体深度增大而增大,这与本研究结论相吻合。

受上游水库影响,雅砻江并流段 TN 在水中的滞留程度远远小于 TP,农业生产活动产生的累积效应与滞留作用,使得下游 TN、TP 浓度大于上游,且在径流中 TN、TP 浓度主要受水土流失作用。雅砻江—安宁河并流段 TN 浓度与含沙量呈正相关关系,而 TP 浓度与含沙量无显著相关性,这进一步验证了张丽萍等^[28]的研究结果。农业生产活动是流域水土流失、氮磷养分差异的主要原因,采取保护性耕作措施、实施水土保持工程等,能有效减少泥沙和氮磷等养分进入地表水体。

不同流域水沙及养分空间分异的影响因素主要包括自然作用下的水土流失与人类活动导致的养分输出。已有研究^[7]表明,流域总磷时空变化呈沿程规律与断面差异性。在此基础上,本研究还发现,流域水体含沙量及 TN 也呈现相同规律。此外,在河流流动过程中,人类活动带来的“城镇—农业”点面污染使河流氮磷浓度呈现出显著的空间差异性,外部污染物的汇入会导致下游氮磷浓度高于上游,在空间分布上,垂向—纵向氮磷浓度分布情况较相似,氮磷沿干流流向向下游呈不断上升趋势,支流氮磷污染较为严重,且对干流养分浓度产生影响,这与周晓雯等^[14]关于山区河流氮磷时空分布研究结果一致。说明雅砻江并流段受人类活动干扰较小,氮磷含量相对较低,而安宁河地理位置靠近山区而又属人类活动频繁区域,中游为全河段最发达地区,区域内河流氮磷主要来源于城市污水、农业生产污染,下游地区不仅农业发达且近年来工业、矿业及城镇化发展迅速,因此,河流氮磷浓度主要受人类活动造成的工农业面源污染影响。

本研究以雅砻江—安宁河并流段为例,初步探讨了水沙及养分空间差异的主要因素,以 6 个监测断面的数据进行研究分析,未进行更复杂的长时段、多断面的监测。在后续研究中,可延长监测时长,增加时间序列上水体泥沙及养分的动态变化,并增加采样断面数,以期进一步分析雅砻江流域水沙及养分的时空分布特征。

4 结 论

(1)安宁河含沙量整体上远大于雅砻江并流段,2 条河流含沙量均呈中下游大于上游,总体沿程增加的趋势。在泥沙断面分布方面,垂向上雅砻江分层现象不明显,安宁河分层现象明显,全流域均表现为含沙量底层>表层>中层;横向上雅砻江表现为右侧分布,安

宁河除上游为右侧分布外,中下游均为左侧分布。此外,雅砻江并流段泥沙断面均匀性优于安宁河。

(2)雅砻江并流段 TN 和 TP 浓度整体均显著小于安宁河流域。在养分断面分布方面,垂向上雅砻江及安宁河底层 TN 浓度均大于表层和中层。雅砻江 TP 浓度为随水深增大而增大,安宁河 TP 浓度中层最小,底层最大。横向上 2 条河流的 TN 及上中游 TP 浓度均为中泓最小,右垂线最大,二者的下游 TP 浓度则为中泓最小,左垂线最大。

(3)雅砻江并流段 TN、TP 浓度与含沙量呈线性正相关,断面横向拟合度优于断面垂向,且 TN 与含沙量的相关性高于 TP;安宁河则是断面垂向拟合度优于断面横向,TP 与含沙量的相关性高于 TN。

参考文献:

[1] 黄杰.延河流域水沙变化时空分布特征及对土地利用变化的响应[D].郑州:华北水利水电大学,2020.

[2] 赵水霞,王文君,全栋,等.黄河干流头道拐水文站水沙运动特征及影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1): 125-131.

[3] 黄晨璐,杨勤科.渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J].干旱区地理,2021,44(2):327-336.

[4] 关颖慧,王淑芝,温得平.长江源区水沙变化特征及成因分析[J].泥沙研究,2021,46(3):43-49,56.

[5] 连运涛,王昱,郑健,等.黑河流域上游水沙输移趋势及其成因分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):98-104.

[6] 蔡雅梅.汾河临汾段典型河岸带氮磷时空分布规律及其影响因素研究[D].西安:西安理工大学,2021.

[7] 卓海华,娄保锋,吴云丽,等.新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析[J].环境科学,2020,41(12):5371-5380.

[8] Batista P V G, Silva M L N, Silva B P C, et al. Modeling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin-Brazil [J].Catena,2017, 157:139-150.

[9] Zak D, Kronvang B, Carstensen M V, et al. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones [J]. Environmental Science and Technology,2018,52(11):6508-6517.

[10] 李瑶,戴文鸿,高嵩,等.黄河下游植被覆盖度动态变化及其与水沙过程关系[J].人民黄河,2022,44(4):31-37,52.

[11] 周汉娥,陈晓飞,何鑫,等.洪湖营养盐时空分布特征及成因分析[J].地球与环境,2021,49(1):9-17.

[12] 张磊,郭丽爽,刘树文,等.四川鲜水河—安宁河断裂带温泉氢氧稳定同位素特征[J].岩石学报,2021,37(2): 589-598.

[13] 侯拉坡.安宁河流域现代农业发展探索[J].合作经济与科技,2019,21(11):40-41.

[2] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.

[3] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.

[4] 张建军,张宝颖,毕华兴,等.黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J].北京林业大学学报,2004,26(6):25-29.

[5] 任艳,薛姣姣,王健,等.黄土区 5 种土壤抗冲性试验分析[J].灌溉排水学报,2017,36(4):42-46.

[6] 蒋定生,范兴科,李新华,等.黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J].水土保持学报,1995,9(2):1-8.

[7] 周正朝,上官周平.子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J].生态学报,2006,26(10):3270-3275.

[8] 王丹丹,张建军,丁杨,等.晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2014,28(3):14-18.

[9] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the northern Loess Plateau [J].Catena,2010,82:87-91.

[10] 何霄嘉,王磊,柯兵,等.中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J].生态学报,2019,39(18):6577-6585.

[11] 刘志,杨瑞,裴仪岱.喀斯特高原峡谷区顶坛花椒与金银花林地土壤抗侵蚀特征[J].土壤学报,2019,56(2):466-474.

[12] 任乐,张科利,郭继成.基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2013,27(1):56-59.

[13] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.

[14] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被条件下土壤抗冲性及其影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):75-79,83.

[15] 吕刚,马君蕙,王磊,等.辽西低山丘陵区不同密度荆条实地放水冲刷试验研究[J].灌溉排水学报,2019,38(增刊 1):94-97.

[16] 屈东旭,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):21-25.

[17] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J].Catena,2017,153:61-65.

[18] Wang Z H, Fang H, Chen M. Effects of root exudates of woody species on the soil anti-erodibility in the rhizosphere in a karst region[J]. Peer J,2017,5(1):e3029.

[19] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J].土壤学报,2014,51(4):806-815.

[20] 熊东红,杨丹,翟娟,等.元谋干热河谷冲沟沟头径流水动力学特性及产沙效应初探[J].水土保持学报,2012,26(6):52-56.

[21] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(6):71-76.

[22] 王健,刘旦旦,张鹏辉.土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(1):65-68.

[23] 陈晏,史东梅,文卓立,等.紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗冲性特征研究[J].水土保持学报,2007,21(2):24-27,35.

(上接第 22 页)

[14] 周晓雯,安艳玲,吴起鑫,等.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[J].水土保持研究,2021,28(4):179-185.

[15] 李廷华.三江并流区水资源特性分析[J].云南水力发电,2003(2):15-18.

[16] 董立俊.雅砻江流域径流对未来气候变化的时空响应研究[D].湖北 宜昌:三峡大学,2020.

[17] 海笑,覃建雄.安宁河流域阳光资源冬季避寒农旅开发价值对比性评价[J].环境影响评价,2021,43(1):63-68.

[18] 四川省地方志编纂委员会编纂.四川省志·地理志.下册[M].成都:成都地图出版社,1996:11-18.

[19] 中华人民共和国水利电力部.GB/T 50159—2015 河流悬移质泥沙测验规范[S].北京:中国计划出版社,1992:12-16.

[20] 温文杰,张建军,李依璇,等.径流含沙量测定方法研究[J].北京林业大学学报,2019,41(11):155-162.

[21] 大连市环境监测中心. HJ 636—2012 水质:总氮的测定[S].北京:中国标准出版社,2012:1-3.

[22] 北京市环保监测中心,上海市环境监测中心.GB/T 11893—1989 水质:总磷的测定[S].北京:中国标准出版社,1989:1-4.

[23] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.

[24] 韩谓,潘保柱,陈越,等.黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J].环境科学,2021,4(4):1-14.

[25] 杨盼,卢路,向晨光,等.长江干流氮、磷浓度变化趋势分析[J].环境工程,2019,37(2):178-181,186.

[26] 何灼伦.青海湖流域河流泥沙变化及影响分析[J].人民黄河,2020,42(10):23-28.

[27] 黎铮.紊动条件下泥沙纵向分布及氮氮吸附释放特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.

[28] 张丽萍,付兴涛,吴希媛.竹林坡地径流中泥沙及氮磷载荷特征模拟[J].应用生态学报,2012,23(4):881-888.