

DOI: 10.5846/stxb201301080059

谭慧娟, 夏晓玲, 吴川, 张全发. 基于碳稳定同位素示踪的金水河颗粒有机碳来源辨析. 生态学报, 2014, 34(19): 5445-5452.

Tan H J, Xia X L, Wu C, Zhang Q F. Identifying sources of particle organic carbon in surface water based on stable isotope tracing in the Jinshui River. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5445-5452.

基于碳稳定同位素示踪的金水河颗粒有机碳来源辨析

谭慧娟^{1,2}, 夏晓玲¹, 吴 川^{1,2}, 张全发^{1,*}

(1. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 颗粒有机碳 (Particle Organic Carbon, POC) 在河流碳循环中占重要地位, 并能提供流域内自然及人类活动的记录。通过采集和测定汉江上游金水河流域河岸带土壤和植物及河流中藻类和悬浮颗粒有机碳 (POC) 的季节性碳稳定同位素值和 C/N 比值, 对河流水体中悬浮颗粒有机碳的浓度的季节性变化特征以及来源及其贡献进行了研究。结果表明, 金水河流域水体中颗粒有机碳 (POC) 的浓度值存在明显的季节性变化特征, 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。河流上游轻度干扰区的 POC 浓度值明显低于中下游中度干扰区和严重干扰区。河流中 POC 主要来源于土壤有机质、C3 植物和藻类 3 个端元, 而来源于浮游生物和 C4 植物碎屑的贡献很小。各季节之间具体的来源及其贡献有所差异, 且 POC 的来源及其贡献具有空间差异。因此, 金水河水体中颗粒有机碳 (POC) 的来源及其贡献受到季节变化和人为干扰程度的影响。

关键词: 金水河; 悬浮物; 颗粒有机碳; 碳同位素比值; C/N 比值

Identifying sources of particle organic carbon in surface water based on stable isotope tracing in the Jinshui River

TAN Huijuan^{1,2}, XIA Xiaoling¹, WU Chuan^{1,2}, ZHANG Quanfa^{1,*}

1 Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Particle organic carbon (POC) in riverine systems is a critical component in the global carbon cycle, and it could provide information on human activities in particular land use in their representative drainage areas. In present study, soil and plant in the riparian zone and algae and POC in river waters were sampled in the Jinshui River Basin. Stable carbon isotopes analysis and elemental C/N ratios measure were applied to investigate the seasonal change of concentration, sources and their contributions of POC in river. The results showed that the POC concentration in river had remarked seasonal variations in the Jinshui River, in a decrease order of summer, spring, autumn, and winter. Larger quantity of soil organic matters and plant debris were washed into the river in spring and summer due to intensive rainfalls, and higher temperature was in favor of algal growing and which could produce more endogenous POC. Additionally, the POC concentration in slightly disturbed zone (i.e., upstreams) was obviously lower than that of moderately disturbed zone and intensely disturbed zone (i.e., middle reach and downstreams). These showed that seasonal change and human disturbance such as change of land use had a great influence on the concentration of POC in the Jinshui River. Qualitative analysis using stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$), elemental C/N ratios and the relational graph indicated that the major sources of POC in river were soil organic matter, C3 plants, and algae, and contribution from plankton and C4 plants were minimal. Ternary analysis model further revealed tempo-spatial variabilities of the sources and their contribution of POC in river. The results showed that the

基金项目: 国家自然科学基金 (31130010, 31200354); 国家“十二五”科技支撑计划 (2012BAC06C03)

收稿日期: 2013-01-08; **网络出版日期:** 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzhang@wbpcas.cn

sources and their contribution of POC in river had remarked seasonal variations in the Jinshui River. But, the contribution of POC in river from endogenous (i.e., algae) was obviously lower than that from exogenous (i.e., soil organic matter and C3 plants). At the same time, the sources and their contribution of POC in river also showed differences between different zones. The POC in slightly disturbed zone and in moderately disturbed zone (i.e., upstreams and middle reach) mainly came from soil organic matter and C3 plants, and they were soil organic matter and algae in intensely disturbed zone (e.g., downstream). Therefore, human disturbance had a great influence on the sources and their contribution of POC in the Jinshui River.

Key Words: jinshui river; suspended matter; particle organic carbon; carbon isotope ratio; C/N ratios

碳循环是碳在大气、海洋、陆地生态系统 3 个主要碳库之间的流动。虽然河流碳循环所输送的碳通量的绝对值不是很大,但河流是连接地球上两个重要碳库——海洋和陆地生态系统的重要通道,同时流域内的自然过程都会反映在河流输送的碳及其性质上。因此河流碳循环的研究是全球碳循环研究非常重要的一个环节。颗粒有机碳(POC)在河流碳循环中占重要地位,颗粒有机碳大约占世界河流总有机碳通量的一半,并且河流输送的颗粒有机碳在河流碳循环和流域土壤侵蚀过程中发挥着重要的作用^[1]。河流颗粒有机碳主要来自陆地表面风化、侵蚀而形成的碎屑有机物质^[2],它与陆地生态系统密切相关,河流颗粒有机碳研究不但提供了碳循环的重要信息^[3],而且也提供了流域内自然及人类活动的记录^[4]。

河水中的悬浮颗粒有机碳通常分外源和自生两类,自生来源于河流中植物叶绿体经光合作用所产生的颗粒物,外源主要来源于土壤侵蚀和植物碎屑。碳、氮同位素作为示踪剂对于研究河流系统的碳、氮循环有着非常重要的作用,并日益成为判别河流系统有机质来源的最有效工具之一^[5-7]。根据不同来源的悬浮颗粒有机质具有特定的碳、氮同位素值变化范围,可对有机质的来源进行判别^[8-9]。国内外相关研究表明,与稳定氮同位素相比较,稳定碳同位素在有机碳溯源分析研究中更不易受生物活动的影响,而具有更高的准确性。稳定碳同位素技术的应用,可更好地研究河流颗粒有机碳的来源和揭示流域植被和土壤侵蚀状态的变化^[10]。早在 20 世纪 60、70 年代, Sackett 等^[11]、Hunt^[12]、Meyers 等^[13]、Shultz 等^[14]就以碳稳定同位素方法,对河口沉积环境中颗粒物来源进行了研究。80 年代, Hedges 等^[4,15]、Richey 等^[16]、Bird 等^[10]对亚马逊河沉积物

碳同位素开展了系统的研究工作。国内河流颗粒有机碳的碳同位素示踪研究还比较少,目前只见到对长江、黄河、珠江、双台子河等河流、河口区的研究报道^[17-19]。

本文采用碳稳定同位素的方法,利用颗粒有机碳(POC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、C/N 比值和关系图以及端元混合模型,来辨析汉江流域上游的金水河流域颗粒有机碳来源端元及其贡献率,了解该流域的水土流失状况及其对河流生态生态系统的影响,从而为区域水环境保护提供理论依据。

1 研究区概况

金水河为汉江的一级支流,该流域地处东经 $107^{\circ}40'$ — $108^{\circ}10'$,北纬 $33^{\circ}16'$ — $33^{\circ}45'$,行政区划上位于陕西省佛坪县和洋县境内(图 1)。该流域属于北亚热带山地暖温带湿润季风气候区,多年平均气温 11.5°C — 14.5°C ,降水量在 900—1244 mm 之间。金水河河道长 87 km,落差 1487 m,流域面积 1517 km^2 ,在佛坪县境内年均径流量为 2.54 亿 m^3 ^[20]。其上游位于陕西佛坪国家自然保护区内,人口密度低,植被覆盖度良好,其下游流经居民区,河流两岸多为农田。农业活动和木材砍伐是这个区域内主要的人为干扰,因此,根据居民密度、农田面积和扰动历史,我们将金水河流域划分为具有不同人为干扰程度的 3 个区域(图 1),依次为:轻度干扰区、中度干扰区和严重干扰区^[21]。轻度干扰区位于佛坪国家自然保护区内,中度干扰区和严重干扰区以佛坪县和洋县的县界为划分边界,3 个区域占流域总面积的百分比依次为 39.8%,29.5%和 30.7%^[21]。轻度干扰区:位于自然保护区境内,河流两岸多为陡坡狭谷,土地利用方式为落叶阔叶林林地,植被覆盖良好,森林覆盖率 95%以上。竹林面积占 44.7%,区域内人迹罕至,

人为干扰活动很少;中度干扰区:河流两岸多为较为开阔的坡地,土地利用方式为农田,种植水稻、红薯、玉米等农作物,人为干扰活动适中;严重干扰区:河流两岸的土地利用方式为农田、2 个采沙场和一些建筑用地,植被覆盖稀少,人为干扰活动多,水土流失较为严重。

2 材料与方法

2.1 样品的采集

在金水河的 15 个采样点,其中轻度干扰区设 5 个(J1、J2、J3、J4、J5),中度干扰区 6 个(J6、J7、J8、J9、J10、J11),严重干扰区 4 个(J12、J13、J14、J15)(图 1)。根据其水文特点,分季节在 2011 年 11 月、2012 年 1 月、4 月、7 月进行了 4 次采样。每个采样点断面设置左、中、右 3 个采样处,采样时使用有机玻璃采水器,测试分析采用三处混合的水样。由于研究区河流水深均不超过 10 m,因此,地表水样在采集时并未分层。水样用直径为 47 mm 孔径为 0.45 μm Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,滤膜先用 10% 的 HNO_3 浸泡 24 h,沥干硝酸后用超纯水将其洗至中性,在无尘环境下阴干,再放入马弗炉中灼烧 4 h,以

去除无机碳。过滤时,每个样点过滤 4—5 L 河水,过滤后的悬浮物样品连同滤膜用锡箔纸包好,放入冰袋中冷冻保存。

在沿河两岸,每一个样点同时采集了土壤、植物样品,土壤样品在河流两侧 200 m 范围内采集,除去表层浮土,取 1—20 cm 的土壤样品,并装入自封袋中。植物样品则在河流两侧采集沿河岸生长较多的不同种类的植物样品(C3 植物、C4 植物分采取),装入自封袋中。用网筛捞取藻类,装入自封袋中,在低温下保存,春季有 7 个样点采取到藻类样品,夏季有 9 个,秋季有 5 个,冬季没有采取到藻类样品。4 次采样共采集 60 份颗粒有机碳(POC)样品、60 份土壤样品、71 份植物样品(其中 C3 植物样品 60 份,C4 植物样品 11 份)和 21 份藻类样品。

2.2 样品的处理与分析

过滤后的悬浮物样品用冷冻干燥机干燥后。滴加数滴 0.5 mol/L 的盐酸,使滤膜完全浸湿,并置于含浓盐酸的干燥器(其底部放有 3 个盛有浓盐酸的小烧杯)中熏蒸 48 h,以除去样品中的无机碳。再用去离子水淋洗样品,直至滤液呈中性,并用硝酸银溶液来检测样品中是否有 Cl^- 残留。再将去除无机碳后的样品进行冷冻干燥后,研磨过筛(100 目),用小封口袋装好备用。

土壤、植被和藻类样品经冷冻干燥后,研磨过筛(100 目)。取 0.5 g 样品,加入 0.5 mol/L 的盐酸 25 mL,在水浴锅中 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温反应 2 h 去除无机碳。样品洗涤方法同上。再将去除无机碳后的样品进行冷冻干燥后备用。

经过上述处理后的样品,用元素分析仪(multi N/C 2100)、同位素质谱仪(Delta V Advantage)测定有机碳含量和稳定同位素组成,同时得出 4 个指标:TOC(Total Organic Carbon)、TN(Total Nitrogen)、碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)和 C/N 比值。同位素计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[(R_{\text{样}} - R_{\text{标}}) / R_{\text{标}} \right] \times 1000$$

式中, $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$,以 PDB 国际标准为参照,分析误差为 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

3 结果与讨论

3.1 金水河流域水体中颗粒有机碳浓度组成的变化
金水河流域颗粒有机碳(POC)的浓度的变化特征见表 1。春季的变化范围为 9.59—23.15 mg/L,平

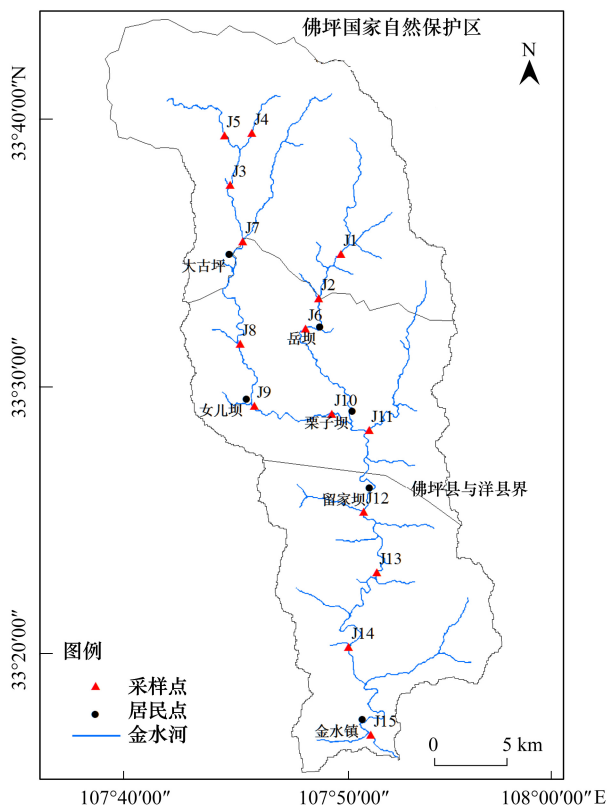


图 1 金水河流域采样点分布图

Fig.1 Schematic of sampling sites in the Jinshui River

均值为 14.27 mg/L;夏季的变化范围为 10.76—33.33 mg/L,平均值为 20.47 mg/L;秋季的变化范围为 7.31—20.89 mg/L,平均值为 13.34 mg/L;冬季的变化范围为 6.54—19.54 mg/L,平均值为 11.52 mg/L。POC 浓度值表现出夏季>春季>秋季>冬季的特点。春夏季是金水河流域降水比较多的季节,在雨水冲刷的作用下,大量的土壤有机质和植物碎屑等被带入河流中。另外,春夏时期,由于气温升高,水生藻类和浮游植物生长旺盛,能贡献更多的自生颗粒有机碳^[22]。

在不同的水文季节,从上游至金水河注入汉江

处,POC 浓度值变化趋势基本一致(图 2)。上游轻度干扰区的 POC 浓度值明显低于中下游中度干扰区和严重干扰区的 POC 浓度值。上游轻度干扰区植被覆盖度好,降雨过后,地表径流冲刷较轻。而中下游地区,人为干扰比较大,多为耕地,地表裸露面积大,降雨冲刷较为严重,因而中下游的中度干扰区和严重干扰区的 POC 浓度远远高于位于保护区内的轻度干扰区。这表明人为干扰程度及土地利用方式的变化对河流水体中颗粒有机碳的含量有比较大的影响。

表 1 金水河流域颗粒有机碳的浓度组成
Table 1 Concentration of POC in the Jinshui River

区域 Zone	样点 Sampling point	颗粒有机碳浓度值 Concentration of particle organic carbon/(mg/L)			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
轻度干扰区 Slightly disturbed zone	J1	11.38	13.98	11.01	7.70
	J2	10.83	13.33	9.01	8.71
	J3	9.59	10.76	7.31	6.54
	J4	10.72	13.22	8.62	8.47
	J5	11.03	15.10	7.73	7.43
中度干扰区 Moderately disturbed zone	J6	9.79	19.97	10.42	9.29
	J7	13.54	17.04	13.98	8.58
	J8	13.01	16.01	15.32	10.02
	J9	23.15	21.15	14.73	12.51
	J10	22.04	24.73	20.07	19.54
	J11	17.01	23.03	20.89	18.55
严重干扰区 Intensely disturbed zone	J12	22.21	29.21	15.31	15.21
	J13	21.73	33.33	19.76	17.63
	J14	17.59	29.09	13.02	12.02
	J15	15.37	27.17	12.97	10.67

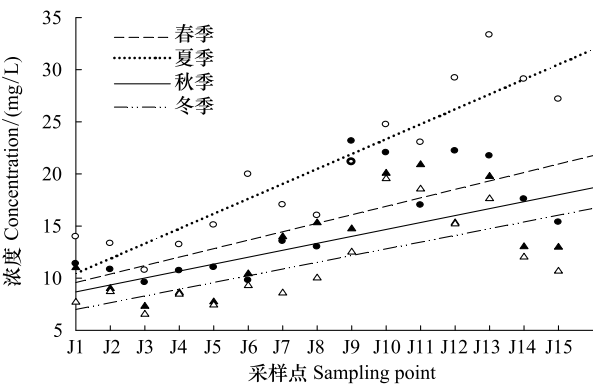


图 2 金水河流域颗粒有机碳(POC)的浓度变化线性回归图
Fig.2 The longitudinal change in POC in the Jinshui River

3.2 金水河流域水体中颗粒有机碳的来源及其贡献的定性分析

碳稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$)、碳氮比值(C/N)及其关系图是定性分析河流颗粒有机碳来源的有效方法,该方法准确应用的前提是不同来源(端元)的C/N比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 范围的合理取值。河流颗粒有机碳潜在来源主要包括C3植物碎屑、C4植物碎屑、土壤有机质、水生维管束植物、河流浮游生物和藻类等六大类^[23]。前人已经对这些端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N比值的范围进行了一些归纳,但由于河流周边环境的差异,各端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N比值的范围肯定会呈现出一定的变化幅度。本研究对金水河流域的土壤、植物、藻类等端元进行了测定(表2),未对浮游生物这一

端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 比值的范围进行测定。Redfield 的研究证明,淡水浮游生物同海洋浮游植物具有相似的 C/N 比值,一般在 6—8 之间^[24],典型的淡水浮游生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -24‰ — -42‰ 之间^[25]。金水河流域水体中水生维管束植物很少,所以可以忽略其贡献。因此本研究仅讨论剩下 5 种可能端元:C3 植物、C4 植物、土壤有机质、浮游生物、藻类。

对表 2 进行分析比较可以得出:金水河流域植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值与前人的研究结果大体一致,而 C/N 比值更偏大一些;土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 比值端元值范围都更宽一些;藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值与前人

的研究结果有差别,其值偏小,可能与河流具有不同的水域环境(如温度、营养元素、水体中的 CO_2 等)而生长的藻类种类不一样有关,C/N 比值的差别不是很大;浮游生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 比值端元值沿用前人的研究结果。

把表 2 中前 4 种端元的实测值 and 前人关于浮游生物的研究结果,作为金水河流域颗粒有机碳的潜在来源范围,与本研究所获水体颗粒有机碳(60 份样品)的分析实验数据进行比较,以初步辨识金水河水体中颗粒有机碳的主要来源。

表 2 金水河流域颗粒有机碳来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 分布

Table 2 The range of ratios of carbon isotope and C/N of POC in the Jinshui River

颗粒有机碳来源 The source of POC	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		C/N	
	前人研究结果 ^[26-27] The results of other people	本研究测定 The results of this study	前人研究结果 ^[26-27] The results of other people	本研究测定 The results of this study
C3 植物 C3 plants	-23—-30	-20.679—-30.127 (-20—-30)	> 15	31.9—19.07 (> 19)
C4 植物 C4 plants	-9—-17	-9.061—-14.589 (-9—-14)	> 15	27.39—16.1 (> 16)
土壤有机质 Soil organic matter	-22—-25	-19.485—-30.704 (-19—-30)	10—13	12.37—8.69 (12.5—8)
藻类 Algae	-22—-28	-31.411—-42.966 (-31—-42)	10—30	32.31—11.54 (32.5—11)
浮游生物 Plankton	-24—-42	—	6—8	—

圆括号代表数据的主要集中范围,前人研究结果数据参照喻涛

图 3 为不同季节金水河流域颗粒有机碳中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 C/N 比值的关系,以及 POC 潜在来源的典型值域范围。从图 3 中可以看出,金水河流域水体中颗粒有机碳主要来源于土壤有机质、C3 植物碎屑以及

藻类 3 个端元,而来源于浮游生物和 C4 植物碎屑的贡献很小。

3.3 金水河流域水体中颗粒有机碳的来源及其贡献的定量分析

为了对该流域颗粒有机碳(POC)的来源有更准确的认识,本研究使用三元混合模型来分析不同来源的贡献率。基于前面的定性研究结果,选定的 3 个端元是:土壤有机质、C3 植物和藻类,由于 C4 植物和浮游生物对水体中 POC 的贡献很小,故忽略这两个端元,下面是相应的端元模型:

$$\begin{aligned}\delta^{13}\text{C}_{\text{样}} &= \delta^{13}\text{C}_S \times f_S + \delta^{13}\text{C}_P \times f_P + \delta^{13}\text{C}_M \times f_M \\ \text{C/N}_{\text{样}} &= \text{C/N}_S \times f_S + \text{C/N}_P \times f_P + \text{C/N}_M \times f_M \\ 1 &= f_S + f_P + f_M\end{aligned}$$

式中, $\delta^{13}\text{C}$ 表示稳定碳同位素值,C/N 表示碳氮比值, f 表示不同来源相应的贡献百分数,角标 S 表示土壤有机质,P 表示 C3 植物碎屑,M 表示藻类。

不同端元值的确定简述如下,土壤有机质、C3

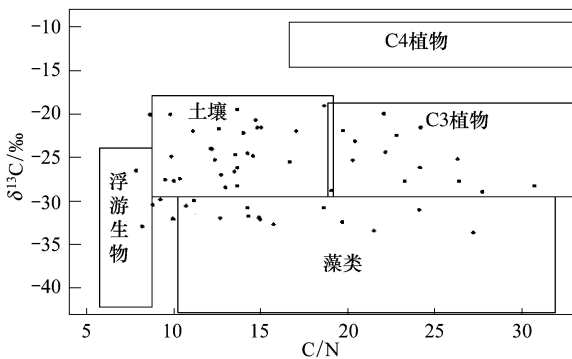


图 3 颗粒有机碳(POC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 关系图

Fig.3 The relational graph for $\delta^{13}\text{C}$ and C/N of POC in the Jinshui River

实心圆点表示颗粒有机碳的数据点,矩形表示不同端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 端元值范围

植物碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 均采用每一个样点的实测值,由于不是每一个样点都采集到藻类,因此藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 均取平均值,经计算得: $\delta^{13}\text{C}_{\text{M}} = -37.7\text{‰}$, $\text{C}/\text{N}_{\text{M}} = 21$ 。

从定量计算的结果(表 3)来看,个别样点某个端元的贡献率超过 100%或低于 0%,对于这些贡献率超出范围不大的分别按 100%和 0%对待。春季,金水河流域水体中的 POC 以土壤有机质的贡献最大(76.0%),其次为 C3 植物碎屑(13.8%),水体中藻类的贡献比较小(10.2%)。夏季,土壤有机质的贡献为 76.1%,C3 植物碎屑的贡献为 12.2%,水体中藻类的贡献为 11.8%。秋季,土壤有机质的贡献为 74.9%,C3 植物碎屑的贡献为 16.0%,水体中藻类的贡献为 9.1%。冬季,土壤有机质的贡献为 81.0%,C3 植物碎屑的贡献为 16.0%,水体中藻类的贡献为 3.0%。总体来看,春、夏、秋、冬 4 个季节,来自于各个端元的贡献依次为:土壤有机质>C3 植物碎屑>藻类,外源的贡献(土壤有机质和 C3 植物碎屑)均远远

大于内源,这可能与在金水河这种较小的河流中,水流速度较快,水生植物和藻类的繁殖受到限制,因而陆地侵蚀物质在河水的悬浮颗粒有机碳中占主导有关。冬季土壤有机质的贡献率最大,这可能与冬季水体中没有藻类和浮游生物生长,内源贡献减小,从而土壤有机质的贡献率相对增加有关,夏季的采样时间为 7 月下旬,正好是金水河流域降水最多的季节,雨水的冲刷作用大,把大量的土壤有机质带入河水中。秋冬时间,植物的叶片多已经凋零,因而有比较多的 C3 植物碎屑进入水体中,成为水体中颗粒有机碳的一部分来源。春夏时节,水体中的水温升高,水体中的藻类大量生长,因而内源的贡献增加,冬季,水体中藻类的贡献仅为 3.0%。通过上面的分析可以得知,总体上,水体中颗粒有机碳多来源于土壤有机质的贡献,其次为 C3 植物碎屑,水体中藻类的贡献比较小,但是各个季节之间具体的来源及其贡献又有所差异,这表明金水河流域水体中颗粒有机碳(POC)的来源及其贡献受到季节变化的影响。

表 3 不同来源对金水河水体中颗粒有机碳(POC)的贡献百分数
Table 3 The seasonal variation of different sources to POC in the Jinshui River

采样点 Sampling point	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn			冬季 Winter		
	$f_{\text{S}}/\%$	$f_{\text{P}}/\%$	$f_{\text{M}}/\%$	$f_{\text{S}}/\%$	$f_{\text{P}}/\%$	$f_{\text{M}}/\%$	$f_{\text{S}}/\%$	$f_{\text{P}}/\%$	$f_{\text{M}}/\%$	$f_{\text{S}}/\%$	$f_{\text{P}}/\%$	$f_{\text{M}}/\%$
J1	61.9	25.5	12.6	67.2	20.5	12.3	66.2	23.5	10.3	67.1	25.7	7.2
J2	66.7	24.1	9.2	66.0	19.0	15.0	66.0	27.7	6.3	66.9	29.9	3.2
J3	70.0	31.2	-1.2	70.0	29.2	0.8	70.1	33.1	-3.2	70.2	33.0	-3.2
J4	69.4	20.1	10.5	70.0	12.1	17.9	68.0	19.2	12.8	78.0	19.2	2.8
J5	71.2	20.0	8.8	71.8	18.0	10.3	71.1	22.9	6.0	75.1	25.0	-0.1
J6	73.9	10.0	16.1	75.1	10.1	14.8	70.1	15.1	14.8	70.5	15.9	13.6
J7	75.1	12.7	12.3	76.0	12.6	11.4	75.8	16.1	8.3	81.8	19.7	-1.5
J8	75.0	11.9	13.1	77.9	11.6	10.5	77.0	15.6	7.4	97.3	5.6	-2.9
J9	72.8	15.7	11.5	72.7	15.7	11.6	72.7	17.8	9.5	82.7	15.8	1.5
J10	80.5	19.1	0.4	81.5	19.6	-1.1	80.5	17.6	1.9	83.6	15.6	0.9
J11	78.0	17.2	4.8	75.4	17.9	6.6	73.4	19.2	7.4	74.4	19.9	5.7
J12	79.0	2.9	18.1	79.9	2.1	18.0	80.9	3.0	16.1	97.9	3.0	-0.9
J13	81.6	1.7	16.7	81.9	-1.7	19.7	83.5	0.4	16.1	84.5	5.3	10.2
J14	100.7	-11.7	11.0	91.7	-9.7	18.0	87.7	-0.7	13.0	97.7	-1.7	4.0
J15	83.6	7.0	9.4	83.7	5.7	10.6	81.0	9.4	9.6	88.0	7.4	4.7
最小值 Minimum	61.9	-11.7	-1.2	66.0	-9.7	-1.1	66.0	-0.7	-3.2	66.9	-1.7	-3.2
最大值 Maximum	100.7	31.2	18.1	91.7	29.2	19.7	87.7	33.1	16.1	97.9	33.0	13.6
平均值 Average	76.0	13.8	10.2	76.1	12.2	11.8	74.9	16.0	9.1	81.0	16.0	3.0

f_{S} f_{P} f_{M} 分别代表来自土壤有机质、C3 植物碎屑和水体中藻类的来源贡献百分含量

从定量计算的来源贡献图(图 4)来看,轻度干扰区 5 个样点(J1、J2、J3、J4、J5)颗粒有机碳的贡献均为土壤有机质>C3 植物碎屑>藻类;中度干扰区有

5 个样点(J7、J8、J9、J10、J11)颗粒有机碳的贡献均为土壤有机质>C3 植物碎屑>藻类,但是有 1 个样点(J6)颗粒有机碳的贡献为土壤有机质>藻类>C3 植

物碎屑;严重干扰区的 4 个样点(J12、J13、J14、J15)颗粒有机碳的贡献均为土壤有机质>藻类>C3 植物碎屑。严重干扰区来自 C3 植物碎屑的贡献率很小。在实际的调查中发现,严重干扰区人为干扰大,有两个采沙场,区域内植被覆盖度低,因此来自于植物碎屑的贡献很少。由此可知,金水河流域水体中颗粒有机碳(POC)的来源及其贡献受到人为干扰程度和土地利用方式变化的影响。

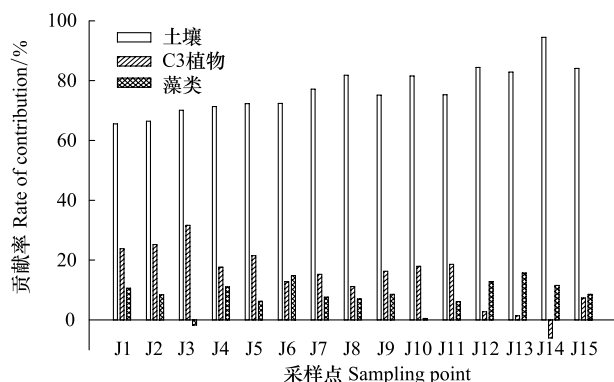


图4 不同来源对金水河流域水体中 POC 的贡献百分数柱状图
Fig.4 The annual average contribution of different sources to POC in the Jinshui River

4 结论

(1)金水河流域水体中颗粒有机碳(POC)的浓度值存在显著的季节性变化特征,其浓度变化依次为夏季>春季>秋季>冬季。在春夏时节,较多的降水带来更多的外源 POC,较高的温度也利于藻类的生长,产生更多的内源 POC。此外,全年所有季节 POC 浓度值在上游轻度干扰区的明显低于中下游中度干扰区和严重干扰区。这表明人为干扰程度及土地利用方式的变化对河流水体中颗粒有机碳的含量有较大的影响。

(2)用碳稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$)、碳氮比值(C/N)和关系图定性分析,在定性分析的基础上,再用三元的端元分析模型进行定量分析,结果表明,金水河流域水体中颗粒有机碳(POC)主要来源于土壤有机质、C3 植物和藻类 3 个端元,来源于浮游生物和 C4 植物碎屑的贡献很小。各季节之间具体的来源及其贡献又有所差异,这表明金水河流域水体中颗粒有机碳(POC)的来源及其贡献受到季节变化的影响。

(3)金水河流域水体中颗粒有机碳的来源及其

贡献具有空间差异。轻度干扰区、中度干扰区的 POC 主要来源于土壤有机质,其次为 C3 植物碎屑,藻类的贡献很少。而严重干扰区的 POC 主要来源于土壤有机质,其次为藻类, C3 植物碎屑的贡献很少。

References:

- [1] Gao Q Z, Tao Z, Yao G R, Liu K X. A preliminary study on the isotope of the riverine particulate organic carbon using AMS in the Zengjiang River, southern China. *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (4): 474-475.
- [2] Mariotti A, Gadel F, Giresse P, Kinga-Mouzeo. Carbon isotope composition and geochemistry of particulate organic matter in the Congo River (central Africa): Application to the study of Quaternary sediments off the mouth of the river. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1991, 86(4): 345-357.
- [3] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 1982, 282(4): 401-450.
- [4] Hedges J I, Clark W A, Quay P D, Richey J E, Devol A H, Santos U de M. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(4): 717-738.
- [5] Cifuentes L A, Coffin R B, Solorzano L, Cardenas W, Espinoza J, Twilley R R. Isotopic and elemental variations of carbon and nitrogen in a mangrove estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(6): 781-800.
- [6] Prahl F G, Small L F, Eversmeyer B. Biogeochemical characterization of suspended particulate matter in the Columbia River Estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 160: 173-184.
- [7] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1301-1346.
- [8] Cifuentes L A, Sharp J H, Fogel M L. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware Estuary. *Limnology and Oceanography*, 1998, 33: 1102-1115.
- [9] Goering J, Alexander V, Haubenstock N. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 30(3): 239-260.
- [10] Bird M I, Fyfe W S, Pinheiro-Dick D, Chivas A R. Carbon isotope indicators of catchment vegetation in the Brazilian Amazon. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6(3): 293-306.
- [11] Sackett W M, Thompson R R. Isotopic organic carbon composition of recent continental derived clastic sediments of Eastern Gulf Coast, Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 1963, 47(3): 525-528.

- [12] Hunt J M. The Significance of Carbon Isotope Variations in Marine Sediments. Oxford: Pergamon Press, 1970: 27-35.
- [13] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(7): 867-900.
- [14] Shultz D J, Carder J A. Organic carbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(4): 381-385.
- [15] Hedges J I, Ertel J R, Quay P D, Grootes P M, Richey J E, Devol A H, Farwell G W, Schmidt F W, Salati E. Organic carbon-14 in the Amazon River system. *Science*, 1986, 231(4742): 1129.
- [16] Richey J E, Brock J T. Organic carbon: oxidation and transport in the Amazon River. *Science*, 1980, 207(4437): 1348-1351.
- [17] Cai D L, Cai A Z. A study on geochemistry of stable carbon isotope in organic matter from Huanghe estuary. *Science in China (Series B)*, 1993, 23(10): 1105-1113.
- [18] Shi G C. Stable isotope of suspended particulate organic carbon in Yangtze estuary and adjacent waters. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(1): 49-52.
- [19] Wu Y, Zhang J, Zhang Z F, Ren J L, Cao J P. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546-552.
- [20] Pu H M, Wang C, Zhang Q F. Non-point source pollution and control in the Jinshui river basin of the upper Hanjiang River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 33-38, 43-43.
- [21] Zhang K R, Zhang Y L, Tian H, Cheng X L, Dang H S, Zhang Q F. Sustainability of social-ecological systems under conservation projects: lessons from a biodiversity hotspot in western China. *Biological Conservation*, 2013, 158: 205-213.
- [22] Checkley D M, Entzeroth L C. Elemental and isotopic fractionation of carbon and nitrogen by marine, planktonic copepods and implications to the marine nitrogen cycle. *Journal of Plankton Research*, 1985, 7(4): 553-568.
- [23] Wei G X, Zhou M N, Guo Z X, Zhu L A. Particulate organic carbon-isotope composition and its spatio-temporal variability of suspended sediment in the Xijiang River, South China. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2127-2131.
- [24] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea-water. New York: InterScience, 1963, 2: 26-77.
- [25] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 1999, 80(4): 1395-1404.
- [26] Yu T. A Study on Sources of Different Grain-Sized Fractions of Organic Matter in the Surficial Sediments from the Northern South China Sea [D]. XiaMen: Xia Men University, 2002.
- [27] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1301-1346.

参考文献:

- [1] 高全洲, 陶贞, 姚冠荣, 刘克新. 增江颗粒有机碳同位素的 AMS 研究初报. 第四纪研究, 2004, 24(4): 474-475.
- [17] 蔡德陵, 蔡爱智. 黄河口区有机碳同位素地球化学研究. 中国科学(B 辑化学生命科学地学), 1993, 23(10): 1105-1113.
- [18] 施光春. 长江口悬浮颗粒有机碳的稳定同位素. 海洋通报, 1993, 12(1): 49-52.
- [19] 吴莹, 张经, 张再峰, 任景玲, 曹建平. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 546-552.
- [20] 卜红梅, 王岑, 张全发. 汉江上游金水河流域非点源污染及控制. 水土保持学报, 2009, 23(4): 33-38, 43-43.
- [23] 魏国秀, 卓慕宁, 郭治兴, 朱立安. 西江水体悬浮物颗粒有机碳稳定同位素组成及时空变化. 生态环境, 2008, 17(6): 2127-2131.
- [26] 喻涛. 南海北部表层沉积物不同粒级组分中有机质来源研究. [D]. 厦门: 厦门大学, 2002.