

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探

郭威^{1,2}, 李祥忠¹, 刘卫国^{1,3*}

(1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710075; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西安交通大学人居环境学院, 西安 710049)

摘要: 通过分析西安周边4条主要河流(泾河、灞河、涝河、黑河)的溶解无机碳(DIC)浓度和碳同位素组成, 初步探讨了西安周边主要河流溶解无机碳(DIC)的浓度变化及碳源。结果表明西安周边主要河流DIC浓度的变化范围为0.34~5.66 mmol·L⁻¹, 平均为1.23 mmol·L⁻¹, 自源头到下游, DIC浓度呈现升高趋势。4条河流δ¹³C_{DIC}值的变化范围在-13.3‰~-7.2‰之间, 平均值约为-10.1‰, 4条河流整体表现为δ¹³C_{DIC}值在源头偏负(平均值约为-12.6‰), 中下游农耕区δ¹³C_{DIC}值偏正(平均值约为-9.4‰), 靠近入渭河河口的城市区δ¹³C_{DIC}表现为偏负值(平均值为-10.5‰)。DIC浓度与河流DIC碳同位素组成的变化规律揭示了河流溶解无机碳来源的变化, 土壤CO₂的输入可能是源头水体DIC的主要来源; 中下游农耕区河水δ¹³C_{DIC}值偏正是由于农业区农作物存在C₄植被(如:玉米), 使得农业区土壤CO₂和土壤碳酸盐具有偏正的碳同位素组成, 进而导致河流水体具有偏正的δ¹³C_{DIC}值; 靠近河口处具有较低δ¹³C值, 污水的大量输入可能导致河水δ¹³C_{DIC}表现为偏负。结果表明西安周边河流溶解无机碳浓度和同位素组成变化大致指示了河流从源头到下游过程中DIC的可能来源, 可为黄土高原小流域河流无机碳来源示踪研究提供参考。

关键词: 河流; 溶解无机碳(DIC); DIC浓度; δ¹³C_{DIC}; 西安市

中图分类号: X131.2; X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)04-1291-07

Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City

GUO Wei^{1,2}, LI Xiang-zhong¹, LIU Wei-guo^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this study, the content and isotopic compositions of water dissolved inorganic carbon (DIC) from four typical rivers (Chanhe, Bahe, Laohe and Heihe) around Xi'an City were studied to trace the possible sources of DIC. The results of this study showed that the content of DIC in the four rivers varied from 0.34 to 5.66 mmol·L⁻¹ with an average value of 1.23 mmol·L⁻¹. In general, the content of DIC increased from the headstream to the river mouth. The δ¹³C_{DIC} of four rivers ranged from -13.3‰ to -7.2‰, with an average value of -10.1‰. The δ¹³C_{DIC} values of river water were all negative (average value of -12.6‰) at the headstream of four rivers, but the δ¹³C_{DIC} values of downstream water were more positive (with an average value of -9.4‰). In addition, δ¹³C_{DIC} of river water showed relatively negative values (the average value of δ¹³C_{DIC} was -10.5‰) near the estuary of the rivers. The variation of the DIC content and its carbon isotope suggested that the DIC sources of the rivers varied from the headstream to the river mouth. The negative δ¹³C_{DIC} value indicated that the DIC may originate from the soil CO₂ at the headstream of the rivers. On the other hand, the δ¹³C_{DIC} values of river water at the middle and lower reaches of rivers were more positive, and it showed that soil CO₂ produced by respiration of the C₄ plants (like corn) and soil carbonates with positive δ¹³C values may be imported into river water. Meanwhile, the input of pollutants with low δ¹³C_{DIC} values may result in a decrease of δ¹³C_{DIC} values in the rivers. The study indicated that the DIC content and carbon isotope may be used to trace the sources of DIC in rivers around Xi'an City. Our study may provide some basic information for tracing the sources of DIC of rivers in the small watershed area in the Loess Plateau of China.

Key words: rivers; dissolved inorganic carbon; DIC concentrations; δ¹³C_{DIC}; Xi'an City

河流被认为是全球碳循环的重要组成部分之一,其在重新分配大气圈,陆地圈和海洋中的碳起重要作用,河流中的碳以溶解质为主要存在形式,其中溶解无机碳占河流碳运输的40%左右^[1,2]。

河流水体溶解无机碳(DIC)主要包括HCO₃⁻、溶解CO₂、CO₃²⁻这3种存在形式,其主要有3种来

源:植物根系呼吸和土壤有机质分解产物土壤CO₂、

收稿日期: 2012-07-02; 修订日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003011, 41073018); “西部之光”博士项目; 黄土与第四纪地质国家重点实验室项目(ZYSQ0811)

作者简介: 郭威(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为同位素地球化学, E-mail: guowei@ieecas.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuwg@loess.11qg.ac.cn

碳酸盐及硅酸盐矿物风化产物和大气 CO_2 ^[3-5]. 此外,水体有机质(包括水体自生的浮游植物,微生物的代谢产物,以及人类排放的污水等)的分解转化也是河水 DIC 的部分来源^[6-9]. 已有的研究表明不同来源的河流溶解无机碳具有显著的碳同位素组成差异. 大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-8\text{‰} \sim -6\text{‰}$, 平均值为 -7‰ ^[10-12]; 土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 $-30\text{‰} \sim -19\text{‰}$, 平均值为 -23‰ ^[2,10,13,14]; 而碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 $-5.3\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$, 平均值为 0‰ ^[2,14]; 人类排放污水具有偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值, 污水的输入会导致河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值降低^[3,11,16]. 利用河流 DIC 的碳同位素组成变化可以有效地示踪河流溶解无机碳的来源^[2,3,13,14,17-20]. 20 世纪 90 年代, Atekwana 等^[16] 就对美国卡拉马祖地区的河流系统中 DIC 浓度及其同位素组成进行分析, 发现河流 DIC 浓度及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化不仅受控于其来源, 同时还受控于河流水气界面 CO_2 交换、水体植物光合作用以及生物生命活动等因素. Brune 等^[15] 通过调查法国西南部地区的农业化小流域 DIC 同位素组成发现, 自然条件下和遭受农业活动影响下的河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值具有明显差异, 分析认为人类活动(农业活动)影响了碳酸盐的风化进程, 进而对河流 DIC 来源产生了影响. 由此可见, 河流 DIC 的碳同位素组成在示踪碳源研究中发挥了重要作用.

从 20 世纪 80 年代开始河流碳循环的研究主要集中在一些世界范围的大河流域, 河流地球化学研究领域的著名学者 Meybeck 等^[21] 曾提出应加强对具有地理特殊性的单个流域碳输出过程的研究^[22]. 近些年来, 具有典型特征的特别是受人类活动影响显著的小流域河流的碳来源研究受到人们的关注^[15]. 黄土高原是我国水土流失严重、生态环境脆弱的地区^[23], 在黄土高原发育的渭河成为黄河的最大支流. 西安周边主要河流发源于秦岭山脉是渭河南岸汇入河流的代表, 也是黄河中游主要产流区的小流域代表, 并形成与北岸河流(黄土高原区)不同的流域环境特征. 近年来, 西安周边河流遭受到来自农业和工业的污染^[24,25], 河流从上游到下游流经自然植被区, 农耕区, 城市工业区, 分区明显, 具有典型受人类活动影响的小流域河流特征. 本研究以西安周边具有典型特征的小流域作为对象, 利用碳同位素分析技术对河流溶解无机碳的可能来源进行了初步探讨.

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

泾河、灞河、涝河、黑河这 4 条河流是西安地区的主要河流, 其中泾河发源于蓝田县西南秦岭北坡汤峪乡之南, 全长 64.6 km, 流域面积 760 km². 灞河发源于蓝田县东部华山断块向南倾斜的老剥蚀面上, 河长 109 km, 流域面积 2 581 km², 泾河灞河交汇后进入渭河^[26]. 涝河发源于户县涝峪南海拔 3 105 m 的静峪脑和海拔 2 822 m 的秦岭梁, 河长 82 km, 流域面积 663 km². 黑河有南北两大源流, 北支发源于太白山主峰拔仙台南侧, 南支又分成两个源头, 其一从太白山开始南流, 其二发源于秦岭主脊海拔 2 838 m 的光头山, 河长 125.8 km, 流域面积 2 258 km², 为西安的供水水源地^[26,27]. 4 条河流流域属温带大陆性季风气候, 枯水期一般出现在冬季, 丰水期出现在夏季, 径流年际变化大、年内分配不均, 河流源头发源于山体, 植被丰富, 其中泾河、涝河发源于秦岭梁和秦岭北坡, 这里的植被主要以落叶阔叶林为主, 黑河源头发源于针叶林, 几条河流在往下游流过程中经过了栽培植被^[26], 下游至河口处均又经过了城市活动区后进入渭河.

1.2 样品采集及分析方法

本研究于 2011 年 11 ~ 12 月沿西安周边 4 条河流(泾河、灞河、涝河、黑河)从源头到河口共采集 35 水样和一个工业排放废水样、一个城市排放污水样. 所有样点均以 GPS 定位(图 1), 野外采集河水样 1.5 L, 利用校准过的哈纳笔式 pH 计(HI98310), 在野外现场测定水体 pH、水温(t)、电导率(EC)和总溶解固体物(TDS)水化学参数. 水样采集后冷藏并迅速运回实验室. 水样过 0.4 μm Whatman 滤膜, 过滤后的水样在 4°C 下冷藏保存, 用于 DIC 浓度及其碳同位素组成测定^[28]. DIC 浓度利用 CM150 碳分析仪测定. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的测定按照文献^[16]的方法, 先将磷酸注入装有小磁棒的反应瓶, 利用真空系统将反应瓶内真

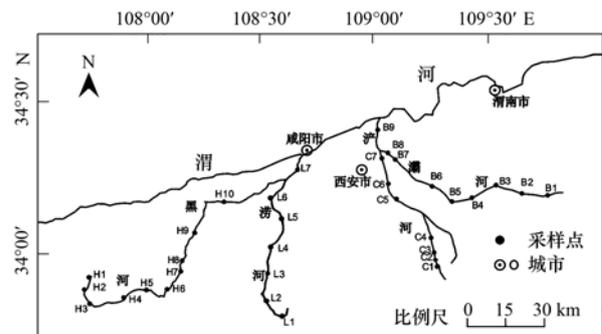


图 1 西安周边河流采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sample locations in the Chanhe River, Bahe River, Laohe River and Heihe River around Xi'an City

空抽至 10^{-3} mbar. 用注射器将水样注入抽真空后的反应瓶,水样与磷酸在 50°C 条件下反应 0.5 h,反应生成的 CO_2 气体,经酒精液氮纯化后,用液氮冷阱收集.纯净的 CO_2 气体进入 Finigan-MAT251 气体同位素质谱仪,进行碳同位素组成测试.测试精度由已知 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 NaHCO_3 溶液控制,同位素值表示为相对于 VPDB, $\delta^{13}\text{C}$ 的分析精度优于 0.2‰.全部样品的碳同位素组成均在中国科学院地球环境研究所稳定同位素实验室测定.

2 结果与讨论

2.1 河水的水化学变化

从表 1 可以看出 4 条河流河水的 pH 值的变化

不大,大部分在 7~8 左右,平均为 7.96,总体偏碱性,由水体 pH 值判断, DIC 主要应以 HCO_3^- 形式存在^[29].电导率(EC)反映水体中的离子强度,总溶解物质(TDS)反映了水体中总溶解物质浓度,4 条河流 EC 的变化范围在 $0.05 \sim 0.92 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均为 $0.25 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,TDS 浓度在 $0.02 \sim 0.46 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $0.12 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,与世界河流 TDS 平均值基本一致($0.12 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[30].4 条河流电导 EC 与 TDS 浓度呈正相关关系($r=0.99, P<0.01$),EC 与 TDS 浓度变化相一致.4 条河流电导率(EC)和 TDS 浓度均从上游到下游呈增加趋势.本研究将所有河流不同样点分为 3 个区域,分别为源头、农耕区和城市区进行讨论(表 2).可以看出,4 条河流从上游到下游

表 1 泾河、灞河、涝河、黑河水化学参数、DIC 浓度及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

Table 1 Chemical parameters, DIC concentrations and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values for the water samples from Chanhe River, Bahe River, Laohe River and Heihe River

河流	采样点	采样点编号	$t/^{\circ}\text{C}$	pH	$\text{EC}/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{TDS}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{DIC}/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$
泾河	汤三	C1	6.3	8.30	0.10	0.05	0.34	-12.81
	汤二	C2	7.9	8.48	0.13	0.06	0.58	-12.86
	汤一	C3	8.1	8.66	0.13	0.07	0.68	-7.69
	汤峪水库	C4	8.2	8.55	0.17	0.08	0.68	-7.94
	三联铁路桥下	C5	9.3	7.95	0.43	0.20	2.10	-10.33
	马腾空桥下	C6	8.4	8.12	0.41	0.20	2.25	-10.21
	十里铺桥下	C7	9.0	7.76	0.46	0.21	0.88	-10.21
灞河	灞源乡	B1	14.5	7.67	0.16	0.08	0.58	-10.16
	万军回	B2	11.2	7.90	0.16	0.07	0.32	-13.14
	九间房乡	B3	13.0	7.78	0.19	0.10	1.08	-8.49
	普化镇	B4	13.5	8.21	0.27	0.13	1.45	-9.7
	蓝田桥下	B5	12.2	8.27	0.27	0.13	0.29	-9.88
	洩湖镇	B6	12.8	8.02	0.32	0.16	1.70	-9.66
	灞桥	B7	12.9	8.11	0.25	0.12	1.49	-9.19
	灞桥下	B8	14.2	8.14	0.31	0.15	1.59	-10.21
	近渭河处	B9	13.4	7.93	0.46	0.23	2.07	-10.92
涝河	涝河源头	L1	7.9	8.22	0.24	0.13	1.24	-8.83
	涝河上游	L2	8.6	8.20	0.21	0.09	0.99	-11.5
	涝河上游	L3	8.5	8.14	0.19	0.10	1.04	-13.33
	涝河大桥下	L4	8.9	8.18	0.24	0.12	1.13	-8.46
	北斑村	L5	10.6	7.70	0.32	0.16	1.05	-9.76
	涝店镇	L6	11.5	7.85	0.92	0.46	5.66	-10.41
	渭丰乡	L7	11.7	8.03	0.64	0.31	3.00	-10.99
黑河	黑河源头	H1	4.6	7.76	0.06	0.03	0.51	-12.94
	靠近源头处	H2	4.8	7.8	0.05	0.02	0.59	-12.4
	沙坝下游	H3	6.3	7.75	0.05	0.03	0.53	-9.65
	磨子口附近	H4	6.1	8.15	0.08	0.04	0.64	-8.03
	三合村	H5	6.4	8.17	0.08	0.04	0.62	-8.01
	黑河中游	H6	6.3	8.13	0.11	0.05	0.87	-11.25
	金井村附近	H7	7.2	7.81	0.14	0.07	1.02	-7.19
	陈河乡	H8	11.2	7.4	0.18	0.09	1.18	-11.06
	马召镇黑河大桥	H9	11.1	7.12	0.18	0.09	1.20	-9.06
	周至黑河大桥	H10	11	6.53	0.22	0.11	1.38	-8.73
污水	马腾空污水	C7-1	7.9	8.57	1.10	0.55	5.63	-15.47
	沔河马王镇污水	F7-1	13.9	7.21	1.23	0.64	7.09	-13.42

表 2 4 条河流各采样点分类

Table 2 Distribution and types of sampling sites along the four rivers

位置	采样点
源头	C1、C2
	B2
	L2
	H1、H2
农耕区	C3、C4、C5
	B1、B3、B4、B5、B6、B7
	L3、L1、L4、L5
	H3、H4、H5、H6、H7、H8、H9、H10
	—
城市区	C6、C7
	B8、B9
	L6、L7
—	—

流动过程中,经历了由源头自然植被到中下游农耕区再到河口城市活动区的变化过程,进入河流的陆源物质逐渐增多. 黑河电导(EC)和TDS浓度的平均值显著低于其他3条河流电导平均值,而涝河电导EC和TDS浓度平均值最高. 由于黑河是西安市的水源地,生态保护好,水体遭受人为扰动要小^[27],这可能是黑河水化学指标与其他3条河流明显差异的主要原因.

2.2 DIC 浓度变化

4 条河流 DIC 浓度的变化范围为 0.34 ~ 5.66 mmol·L⁻¹,平均为 1.2 mmol·L⁻¹略高于世界其他河流平均值 0.9 mmol·L⁻¹^[17],低于欧洲河流平均值 1.5 mmol·L⁻¹^[31],4 条河流 DIC 浓度变化与 EC 及 TDS 的变化趋势一致. 从源头到下游,DIC 浓度均呈现增加趋势(图 2).

4 条河流的源头水体均发源于秦岭山间,岩体多属硅酸盐类,土壤发育较弱,针叶林、阔叶林等自然植被生长在较薄的、含有大量枯落物的土壤上,DIC 的来源可能相对单一. 源头水流速度较快,水气交换作用微弱,导致源头 DIC 浓度较低(平均值为 0.56 mmol·L⁻¹). 河流 DIC 浓度在中下游开始逐渐升高(平均值为 1.05 mmol·L⁻¹). 4 条河流的中下游地区主要分布农耕区,强烈的农业活动加速了土壤侵蚀的程度. 同时一些含碳农业肥料和农药残留物也会随降水产生的地表或地下径流进入河流,导致河水外源物质增加,这些因素可能导致 DIC 浓度升高^[15,19]. 在往下游接近河口的过程中河流开始进入城市活动区,尽管城市活动区农田面积减少,土壤侵蚀物的输入减少,但是城市区工业废水和生活污水的大量排放也可能导致 DIC 浓度升高. 同时城市区修筑的河堤使水流面积扩大、水流缓慢,流水停留时间长,在微生物作用下促进了河流中有机质的分解转化,从而使 DIC 浓度继续增加(平均值为 2.58 mmol·L⁻¹),并达到高值^[3,11].

从表 1 和图 2 中可以看出,涝河 L6 点 DIC 浓度明显高于其他河流各点,以及泾河 C5 和 C6 点的 DIC 浓度明显高于该河流其他点位,采样过程中发现这 3 点附近有城市垃圾堆积以及工业废水排放,具有较高 DIC 浓度的污水输入可能是这 3 个样点河水 DIC 浓度异常升高的原因^[8,9,32,33].

2.3 河流 DIC 碳同位素组成变化特征及可能的碳来源分析

从表 1 中可以看出河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化范围在

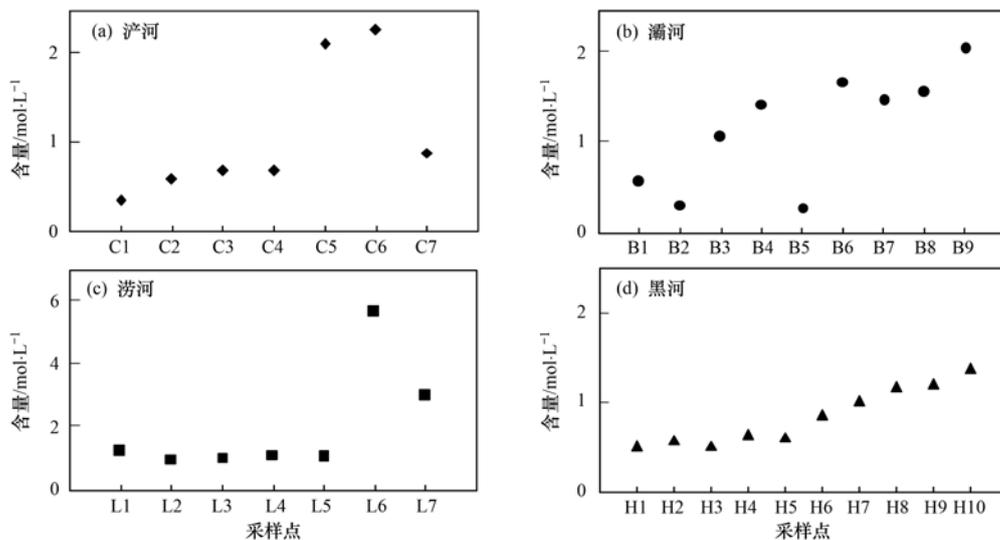


图 2 4 条河流 DIC 浓度变化趋势

Fig. 2 Variation of DIC concentration along the four rivers

-13.3‰ ~ -7.2‰, 平均值为 -10.1‰, 根据 4 条河流采样点位置按照源头、农耕区、城市活动区进行初步的分类发现总体上这 4 条河流从源头到农耕区再到城市区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值有先升高后降低的趋势 (图 3)。河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化反映了河流水文过程中 DIC 的变化及来源的差异, 结合 DIC 浓度数据本研究初步分析了 4 条河流 DIC 的可能来源。

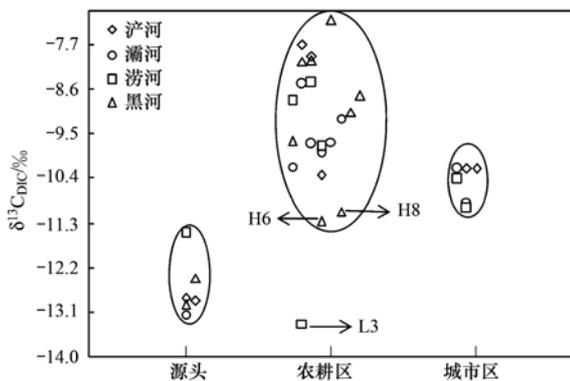


图 3 灞河、涝河、泾河、黑河从源头到河口 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分布

Fig. 3 Variations of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values in the river water from the headstream of the rivers to the river mouth

2.3.1 河流源头 DIC 来源

4 条河流源头水体 (表 1 和表 2) $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的平均值为 -12.6‰, 河流源头 DIC 浓度 (平均值为 $0.56 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 较低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值均偏负, 4 条河流源头水体主要来源于由降水汇集而成的地表径流和地下径流以及直接降水, 地下径流和地表径流的 DIC 来自于植物根系的呼吸作用以及土壤有机质的分解作用产生的土壤 CO_2 ; 降水中的 DIC 主要来自大气 CO_2 的溶解。已有研究表明土壤 CO_2 的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 -23‰, 土壤 CO_2 溶解水中后, 水体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 理论值为 -23‰ ~ -13‰, 平均值为 -17‰^[14,34,35], 大气 CO_2 溶于水中会产生同位素分馏^[34,35], 本研究中 4 条河流源头大气 CO_2 的实测平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -9.1‰, 如果源头大气 CO_2 完全溶于水中, 则水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值应为 -1.1‰。可以看出源头水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值与土壤 CO_2 溶于水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值接近, 土壤 CO_2 可能是其主要来源。另外源头水体进入河流的过程中其他影响因素较小 (砾石河床, 远离城市和农业活动区, 源头水质清澈没有发现水生植物), 基本可以忽略碳酸盐对源头水体的贡献, 以及其他因素对 DIC 的影响, 可近似认为源头 DIC 只有两种源的贡献 (土壤 CO_2 和大气 CO_2)。根据质量平衡模式, 利用土壤 CO_2 溶于水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 特征值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} \approx$

-17‰) 和大气 CO_2 溶于水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 特征值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} \approx -1.1‰$), 来计算源头水体 DIC 来源的相对贡献率。结果显示, 源头水体 DIC 来自土壤 CO_2 的相对贡献为 72%, 而来自大气 CO_2 的相对贡献为 28%。

2.3.2 中下游农耕区 DIC 来源

4 条河流中下游农耕区 (表 2) DIC 浓度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值 (平均值为 -9.4‰) 总体呈升高趋势。中下游河流多属农耕区, 并由源头的自然植被过渡到农作物栽培植被, 植被的这种变化可能引起降雨过程中土壤侵蚀加剧, 进而土壤 CO_2 和土壤碳酸盐向河流的排放增加, 并导致 DIC 浓度升高^[10]。另一方面, 研究表明土壤碳酸盐同位素组成与土壤 CO_2 存在同位素平衡, 土壤 CO_2 主要来自于土壤呼吸作用的 CO_2 (包括植物根系呼吸作用产生的 CO_2 和植物残体的氧化分解以及微生物作用形成的 CO_2), 土壤呼吸 CO_2 保留着土壤有机质的同位素信号并与上覆在表面的植被直接联系^[10]。因此, 土壤碳酸盐和土壤 CO_2 的碳同位素组成与 C_3 和 C_4 植物的生物量比例相联系^[36]。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化趋势可能指示了农业区农作物植被覆盖 (C_3 和 C_4 的混合农作物植被) 对土壤 CO_2 和土壤碳酸盐碳同位素值的影响。

本研究区河流上游主要是自然森林, 以 C_3 植被覆盖为主, 具有偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值 (-32‰ ~ -20‰), 而中下游农业区以 C_3 、 C_4 混合农作物植被 (小麦、玉米等) 为主, 其中以玉米为代表的 C_4 植被具有较大的生物量, 且 C_4 植被具有偏正的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值 (-15‰ ~ -9‰), 可能会导致中下游农耕区土壤碳酸盐和土壤 CO_2 具有偏正的碳同位素值。具有偏正同位素值的土壤碳酸盐和土壤 CO_2 的溶解输入河流, 从而造成河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏正^[10]。同时农耕区含碳农业肥料和农药的输入可能会造成水体 DIC 碳同位素组成的变化, 本研究调查了一些农业肥料和农药的碳同位素组成, 这些含碳农业肥料和农药具有较负的碳同位素组成, 其碳同位素组成范围在 -20‰ ~ -27‰。河流在进入农耕区后, 其水体 DIC 碳同位素组成明显偏正, 显示农业肥料和农药输入可能并未对河流 DIC 碳同位素组成造成直接的影响。

图 3 中可以看出中下游的 L3、H6 点 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值分别为 -13.33‰ 和 11.25‰) 明显较中下游其他点的同位素值偏负, 其原因可能是该处为山前汇水处, 四周山体环绕, 山上植被丰富, 导致该处来自土壤

CO₂ 的相对贡献增加。

2.3.3 靠近河口城市活动区 DIC 来源

在城市活动区(表 2) DIC 浓度达到最高值而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏负(平均值为 -10.5‰)。与农耕区相比城市区环境发生了较大的变化,农田面积减少,河流两旁修建了护堤,水流缓慢,水流面积扩大,有助于水体有机质的分解^[31,37~39],从而造成水体中 DIC 浓度增加。另外,大部分河流的二氧化碳分压均高于大气二氧化碳分压,从而导致河水溶解 CO₂ 向大气扩散。由河水向大气的逃逸在河口区表现的相对明显,若无其他 DIC 来源,CO₂ 的逃逸作用不仅会造成河流 DIC 浓度降低,而且导致河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏正^[40]。然而,本研究结果显示,河口城市区却表现出较高的 DIC 浓度和偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值,笔者推测一个高 DIC 浓度且低 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的外源输入可能导致了这一结果。

采样过程中,在城市区发现了污水排放口,河流水质也发生明显的变化。通过分析采集的城市污水和工业废水样 C6-1 和 F7-1,这两个样品具有较高的 DIC 浓度(分别为 $5.63 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.09 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)和较低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值(分别为 -15.5‰ 和 -13.4‰)。农田面积的减少以及河岸修建的护堤使城市区碳酸盐的输入相对较少,在没有其他碳源输入的情况下,下游河流和河口处 DIC 可能来源于污水的输入。忽略土壤碳酸盐的输入,可近似认为城市区河流 DIC 一方面保留了上游农耕区的河水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值信号(平均值约为 -9.4‰),另一方面有来自污水的输入(平均值约为 -14.5‰)。通过质量平衡模式估算,污水对于城市区河水 DIC 的贡献约为 22%。

污水对于河流 DIC 的影响是一系列生化过程的结果,污水汇入增加了水体有机质的富集,污水中有机质的分解过程会导致河流 DIC 浓度升高而使水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏负^[3,11,16]。Wachniew^[8] 的研究表明未经处理的污水含有大量有机物质,有机质分解过程中的矿化作用会导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 下降 4% 左右,多种废水混合排放的有机碳会导致河流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏负。笔者认为污水或废弃物的输入可能是河口城市区以及中游下游 H8 点(图 3, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} \approx -11.06\text{‰}$, 采样过程中该点属于城市中心,发现河岸边有大量垃圾堆放)较其他点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏负的原因。

3 结论

(1) 西安周边 4 条河流水体 EC、TDS 浓度、

DIC 浓度从源头到下游呈现逐渐升高的趋势,这种趋势反映出河流从源头到下游,流域环境变化,土壤侵蚀加剧,陆源物质的排放增多,从而引起水体 EC、TDS 浓度和 DIC 浓度的升高。

(2) $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化趋势表现为自源头到河口总体上呈现先升高后降低的趋势。结合 DIC 浓度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化趋势,分析认为,河流从源头到中下游农耕区再到城市区 DIC 来源发生了变化,源头 DIC 可能主要来自土壤 CO₂,中下游农耕区可能受农业活动的影响,DIC 主要来自于碳酸盐的溶解,而在城市区靠近河口处,城市污水的输入对河流 DIC 的组成有较大贡献。

(3) 尽管上述结论还需进一步细致的研究得以验证,但该结果显示河流 DIC 浓度及其碳同位素组成研究对辨析西安周边乃至黄土高原小流域溶解无机碳来源具有巨大潜力,值得开展更为深入的工作。

参考文献:

- [1] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: Sources, global typology and budget[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, **70**(1-4): 443-446.
- [2] Brunet F, Gaiero D, Probst J L, *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ tracing of dissolved inorganic carbon sources in Patagonian rivers (Argentina)[J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(17): 3321-3344.
- [3] Yang C, Telmer K, Veizer J. Chemical dynamics of the "St. Lawrence" riverine system: $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$, and dissolved $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(5): 851-866.
- [4] 高全洲,陶贞. 河流有机碳的输出通量及性质研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(6): 1000-1002.
- [5] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 170-175.
- [6] Whiticar M J. Stable isotope geochemistry of coals, humic kerogens and related natural gases[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1996, **32**(1-4): 191-215.
- [7] Ernesto O, Randolph C, John E, *et al.* The distribution and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved organic carbon and its humic fraction in estuaries of southeastern USA [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **56**(5-6): 1187-1194.
- [8] Wachniew P. Isotopic composition of dissolved inorganic carbon in a large polluted river: The Vistula, Poland [J]. *Chemical Geology*, 2006, **233**(3-4): 293-308.
- [9] Atekwana E A, Fonyuy E W. Dissolved inorganic carbon concentrations and stable carbon isotope ratios in streams polluted by variable amounts of acid mine drainage [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **372**(1-4): 136-148.
- [10] Cerling T E, Solomon D K, Quade J, *et al.* On the isotopic composition of carbon in soil carbon dioxide [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**(11): 3403-3405.

- [11] Pawellek F, Veizer J. Carbon cycle in the upper Danube and its tributaries: $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ Constraints [J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 1994, **43**(3-4): 187-194.
- [12] Wang B, Liu C Q, Peng X, *et al.* Stable carbon isotope as a proxy for the change of phytoplankton community structure in cascade reservoirs from Wujiang River, China [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2011, **8**(1): 831-856.
- [13] Amiotte-suchet P, Aubert D, Probst J L, *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ pattern of dissolved inorganic carbon in a small granitic catchment; the strengbach case study (Vosges mountains, France) [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 129-145.
- [14] Telmer K, Veizer J. Carbon fluxes, pCO_2 and substrate weathering in a large northern river basin, Canada; carbon isotope perspectives[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 61-86.
- [15] Brune F, Potot C, Probst A, *et al.* Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2011, **25**(19): 2682-2690.
- [16] Atekawana E A, Krishnamurthy R V. Seasonal variations of dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ of surface water: Application of a modified gas evolution technique[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**(3-4): 265-278.
- [17] Aucour A M, Sheppard S M F, Guyomar O, *et al.* Use of ^{13}C to trace origin and cycling of inorganic carbon in the Rhône river system[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 87-105.
- [18] Helie J F, Hillaire M C, Rondeau B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River-Isotopic and chemical constraint [J]. *Chemical Geology*, 2002, **186**(1-2): 117-138.
- [19] Ogrinc N, Markovics R, Kanduć T, *et al.* Sources and transport of carbon and nitrogen in the River Sava watershed, a major tributary of the River Danube[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(12): 3685-3698.
- [20] Liu W G, Xing M. Isotopic indicators of carbon and nitrogen cycles in river catchments during soil erosion in the arid Loess Plateau of China[J]. *Chemical Geology*, 2012, **296-297**: 66-72.
- [21] Meybeck M, Vörösmarty C. Global transfer of carbon by rivers [J]. *Globe Change Newsletter*, 1999, **37**: 18-19.
- [22] 姚冠荣, 高全洲. 河流碳循环对全球变化的响应与反馈[J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(5): 50-60.
- [23] 王敏, 王佳武, 赵跃文, 等. 黄河中游岩土侵蚀问题及防治对策探讨[J]. *陕西地质*, 2011, **29**(2): 91-95.
- [24] 邢萌, 刘卫国. 西安泾河、灞河硝酸盐氮同位素特征及污染源示踪探讨[J]. *地球学报*, 2008, **29**(6): 783-789.
- [25] 邢萌, 刘卫国, 胡婧. 泾河、涝河河水硝酸盐氮污染来源的氮同位素示踪[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2305-2310.
- [26] 宋德明, 吴成基, 焦尊生, 等. 西安市地理志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1988. 127-145.
- [27] 杨海坤, 莫淑红. 黑河流域主要水文要素变化特征分析[J]. *西北水力发电*, 2006, **22**(1): 28-31.
- [28] Li X Z, Liu W G. Effect of preservation on the $\delta^{13}\text{C}$ value of dissolved inorganic carbon in different types of water samples [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2011, **47**(3): 379-389.
- [29] Zeebe R E. An explanation of the effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal oxygen isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(13-14): 2001-2007.
- [30] Sarin M M, Krishnaswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems, India [J]. *Nature*, 1984, **312**(5994): 538-541.
- [31] Sivaji P, 刘丛强, 李思亮, 等. 长江口溶解无机碳循环的地球化学研究[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(4): 409-413.
- [32] 李思亮, 刘丛强, 陶发祥, 等. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用[J]. *地球化学*, 2004, **33**(2): 165-170.
- [33] Vetter W. Utility of stable isotopes of hydrogen and carbon as tracers of POPs and related polyhalogenated compounds in the Environment [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 679-703.
- [34] Deuser W G, Degens E T. Carbon isotope fractionation in the system CO_2 (gas)- CO_2 (aqueous)- HCO_3^- (aqueous) [J]. *Nature*, 1967, **215**(5105): 1033-1035.
- [35] Halas S, Szaran J, Niezgodna H. Experimental determination of carbon isotope equilibrium fractionation between dissolved carbonate and carbon dioxide[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(13): 2691-2695.
- [36] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, **71**(2): 229-240.
- [37] Zhang J, Quay P D, Wilbur D O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(1): 107-114.
- [38] Myrbo A, Shapley M D. Seasonal water-column dynamics of dissolved inorganic carbon stable isotopic compositions ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) in small hardwater lakes in Minnesota and Montana [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(11): 2699-2714.
- [39] 俞元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征[J]. *科学通报*, 2008, **53**(16): 1935-1941.
- [40] Doctor D H, Kendall C, Sebestyen S D, *et al.* Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic Carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream [J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(14): 2410-2423.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行