

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例

鄂馨卉^{1,3}, 汪亚峰^{1*}, 高扬^{2*}, 陈利顶¹, 陈世博^{2,4}, 陈维梁¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过对黄土高原典型坝系流域雨季碳沉降与径流碳输移过程的研究, 探讨降雨径流过程对流域碳流失的驱动机制, 并进一步评估流域碳侵蚀通量。结果表明, 羊圈沟坝系流域湿、干季碳沉降月通量为 $3.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 干湿季碳沉降存在一定变化且对流域碳输出贡献较小。流域 8 月碳输出量为 $944.89 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 其中 DOC、DIC 输出量分别占 55.39%、44.61%; 9 月碳输出量为 $300.29 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, DOC、DIC 输出量分别占 23.03%、79.97%, 不同降雨强度径流的碳流失量不同, 总体溶解性无机碳输出比重较大。羊圈沟小雨强降雨事件中径流溶解性碳输出量为 $156.98 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 中等雨强降雨事件中径流碳输出 $284.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$; 该流域雨季月均碳流失模数为 $1.89 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$, 经评估得出研究区域年碳流失模数为 $2.70 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

关键词: 黄土高原; 碳输移; 降雨径流; 坝系流域; 碳流失

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3264-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612074

Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China: A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed

E Xin-hui^{1,3}, WANG Ya-feng^{1*}, GAO Yang^{2*}, CHEN Li-ding¹, CHEN Shi-bo^{2,4}, CHEN Wei-liang¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, by monitoring carbon transportation and its rainfall-runoff process during the rainy season in Loess Plateau's Yangjuangou dam watershed, we analyzed changes in carbon transportation driven by rainfall and further evaluated the C loss flux for the dam watershed. Results showed that the monthly C wet deposition flux for the wet and dry seasons were $3.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $2.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, which were only small contributions to C transportation for the watershed. C transportation under the rainfall-runoff process in this watershed can reach $944.89 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ and $300.29 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ in August and September, respectively. Different intensities of rainfall runoff lead to different C loss processes, wherein dissolved inorganic carbon (DIC) is the main C form. Under small rainfall events, the output of dissolved total carbon (DTC) in this watershed was $156.98 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$; and the output of moderate rainfall events was $284.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. Finally, we determined that the C loss modulus of the Yangjuangou watershed was $1.89 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$ in the rainy season, thus the C loss modulus for the study area could reach $2.70 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.

Key words: Loess Plateau; C transportation; rainfall runoff; dam watershed; carbon loss

我国黄土高原总面积为 64 万 km^2 , 土壤侵蚀面积高达 39 万 km^2 , 其中黄土丘陵区是土壤侵蚀较为严重的地区^[1], 降雨及径流过程是导致土壤侵蚀的主要动力, 也是造成流域碳输移的主要原因^[2]。土壤侵蚀导致的碳输移形态分为泥沙态、颗粒态和可溶态, 可溶态碳因溶解作用包括部分颗粒碳与泥沙态碳。土壤侵蚀作用导致泥沙输移过程中土壤有机质矿化形成碳排放源, 进而促使土壤界面 CO_2 向大

气排放, 而有机质泥沙在搬运过程中沉积会形成 C 汇^[3,4]。假设泥沙态输移比按 10% 计算, 泥沙中有

收稿日期: 2016-12-08; 修订日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金中英合作重大项目(41571130083); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2015-2-2); 中国科学院青年创新促进会项目

作者简介: 鄂馨卉(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为景观生态学, E-mail: 504944456@qq.com

* 通信作者, E-mail: yfwang@rcees.ac.cn; gaoyang@igsrr.ac.cn

机碳含量为 2% ~ 3% ,全球每年有 $4.0 \times 10^{12} \sim 6.0 \times 10^{12}$ kg C 进入水体,假设碳进入水体会 有 20% 碳释放,则有 $0.8 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{12}$ kg C 排放到大气^[5,6].

目前,降雨径流对碳流失影响方面的研究已取得一些进展:降雨与土壤有机碳流失程度与土壤侵蚀强度呈明显线性关系,有机碳输移的主要载体为泥沙,并且在迁移过程中细颗粒、低密度的有机碳组分被优先选择^[7,8];降雨强度和持续时间对径流及泥沙中碳输移影响显著,径流随雨强增大而增大,大雨强和小雨强条件下随径流泥沙流失的有机碳总量相差近 18 倍^[9];植被覆盖还会在一定雨强条件下抑制有机碳的流失^[10]. 黄土高原由于气候干旱、地势地形复杂、地表植被稀疏及人为活动等因素,成为全国水土流失最严重的地区^[11]. 降雨尤其是暴雨过程是引发黄土高原土壤 C 侵蚀、水土流失的主要因素^[12]. 本文通过以黄土高原区典型坝系流域为研究对象,揭示流域尺度上降雨对不同形

态碳输移的驱动机制,探讨降雨径流过程对土壤 C 流失的影响,以期为深入评估黄土高原碳流失及其水文过程驱动机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于延安市宝塔区东北方向 14 km 的羊圈沟流域(图 1),隶属于中国科学院生态环境研究中心的黄土高原丘陵沟壑区羊圈沟野外观测站(36°42'N,109°31'E). 研究区流域处于黄河中游区,流域面积为 2.02 km²,海拔 1 050 ~ 1 298 m,研究区土壤主要类型为黄绵土,抗蚀性差,质地均一,水土流失严重,且由于长期掠夺式耕种导致土壤有机营养物质贫乏,肥力很低^[13]. 该区域属于半干旱大陆性季风气候,年均气温 10.8℃,年平均降水量为 498 mm,降雨年际变化率大,主要集中于 7 ~ 9 月. 流域土地利用方式主要为林地、草地、坡耕地、梯田农地和果园. 流域植被受人为活动干扰,原有自

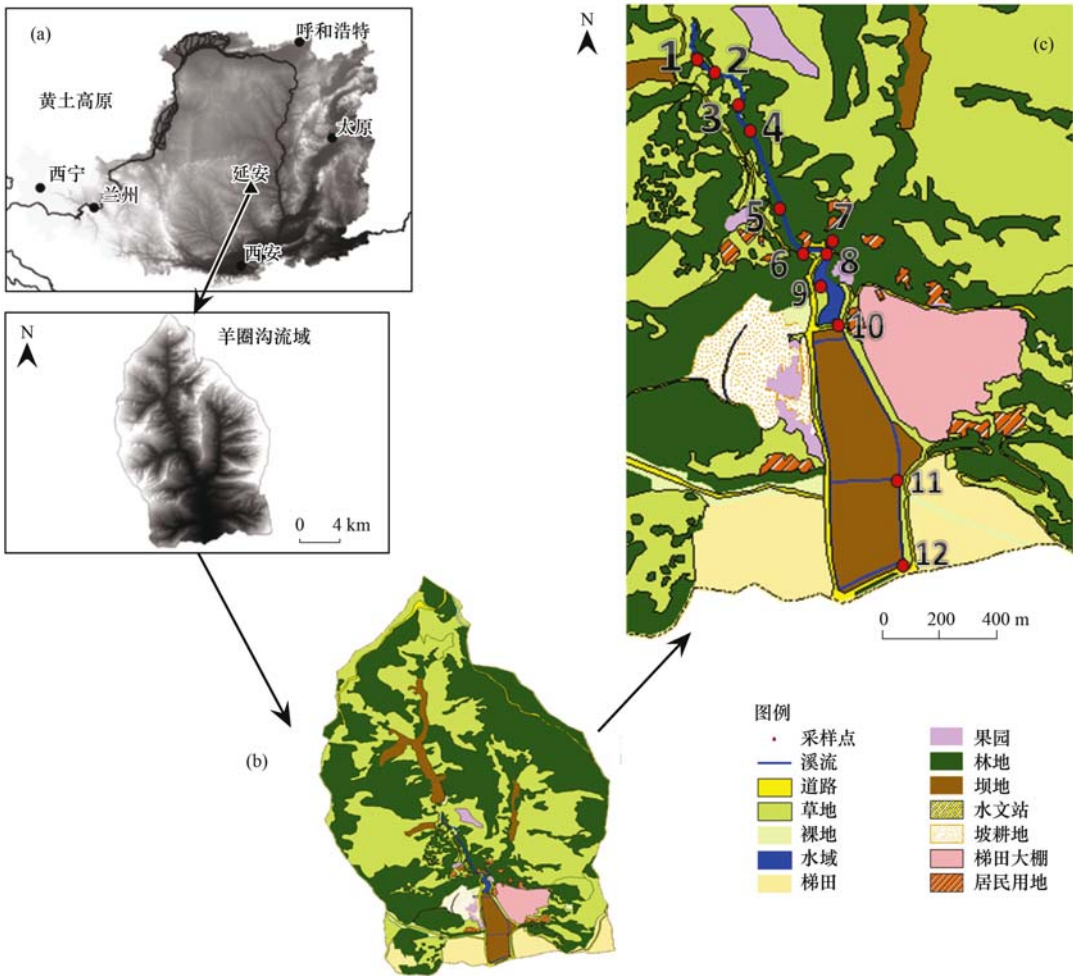


图 1 羊圈沟地理位置、土地利用方式及流域采样点分布示意

Fig. 1 Sampling point distribution and different land uses in the Yangjuangou watershed

然植被所剩无几,多数为人工种植的次生植被,植物种类主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柳树(*Salix* spp.)和杨树(*Poplar* spp.)等^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 监测样点布设

依据流域不同土地利用方式以及空间分布特点设置固定监测点 12 个,供常规采样。样点 6 号、12 号处设水文站,样点 1 北部降雨量少时则无流水。依据草地、林地、水塘、耕地 4 种土地利用方式划分为 4 段,即 A、B、C、D 段(表 1),可以直接观测不同土地利用方式对流域碳浓度变化的影响。对流域不同土地利用方式(图 1)面积进行统计:林地面积为 92.15 hm²,草地面积 70.62 hm²,将坡耕地、坝地、梯田大棚、果园均定为耕地,其面积为 21.07 hm²,水域面积为 0.44 hm²。样点布设能够涵盖流域主体的土地利用方式,具有典型代表意义。

表 1 流域采样点分布位置及描述^[15]

位置	采样点	土地利用方式	地理位置	备注
A 段	1	草地	常流源头	无居民居住
	2	草地	大转弯	附近种植玉米
	3	草地	核桃树	放羊
B 段	4	林地	核桃树 + 石磨	
	5	林地	左支沟口前 50 m	居民区
	6	林地	左支沟水文站	
C 段	7	水塘	右支沟水文站	不在河流里
	8	水塘	水塘上	
	9	水塘	水塘中	
	10	水塘	水塘下	
D 段	11	耕地	耕地排水口	试验站
	12	耕地	淤地坝水文站	

1.2.2 样品采集与分析

研究区内样品采集分常规采样及驱动采样两种方式:样品采集时间在生长季内(5~9月);常规水样选取 8、9 月为区分干湿季于每月 10 日和 20 日采集两次,在 1~12 号固定监测点[见图 1(c)]用聚氯乙烯瓶深入沟渠断面中部位置采集水样,对流域碳浓度变化进行分析;驱动采样以水文条件驱动 ISCO 6712 全尺寸便携式水质自动采样器进行采集,水文驱动条件以水文站的明渠中水位或者流速达到所设定值(水位 ≥ 0.06 m,流速 ≥ 0.001 m·s⁻¹)所驱动采样器进行自动采样,自动采样器每隔 30 min 自动采集 200 mL 径流样,每次采集 24 个径流水样结束该次采样活动,ISCO 6712 全尺寸便携式水质自动采样器能够同时实时监测明渠中的水

位及流速;雨水样品通过安装于流域内采样点 6 号周围的左支沟、村支部所在屋顶、试验站站顶 3 处的雨水采集器进行采集,2015 年 7 月共采集到 14 场降雨,其中 7、8 月湿季共 11 场,9 月干季共 3 场。降雨数据由设于观测站的自动气象站获得。

采集的雨水水样、常规水样及径流过程样经过 0.45 μm 有机微孔滤膜过滤取 100 mL 于聚氯乙烯瓶中编号,4℃ 冷藏保存,送至实验室分析。水样溶解性总碳(DTC)、溶解性有机碳(DOC)和溶解性无机碳(DIC)通过总有机碳分析仪(德国 Vario TOC 型号)测定。

1.3 数据分析

1.3.1 径流量及碳流失负荷计算方法

地表径流量采用式(1)进行计算:

$$x = \int_0^t q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \Delta t_i \quad (1)$$

碳流失负荷采用式(2)进行计算:

$$y_i = \int_0^t c_i(t) q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} c_i Q_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (2)$$

式中, x 为径流量(m³); y_i 为碳流失负荷(g); c_i 为 t 时刻径流中的碳浓度(mg·L⁻¹); q_i 为 t 时刻的流量(m³·s⁻¹); c_i 为样本 i 监测时的碳浓度(mg·L⁻¹); q_i 为样本 i 在监测时的流量(m³·s⁻¹)。

1.3.2 监测点流域碳输出负荷

监测点流域碳输出负荷采用式(3)进行计算:

$$p = c_c \cdot Q \quad (3)$$

式中, p 为监测点碳的输出量(g); c_c 为流域碳平均浓度(mg·L⁻¹); Q 为流域总径流量(m³)。

1.3.3 碳湿沉降通量计算方法

研究流域碳湿沉降通量采样式(4)进行计算^[16]:

$$F = \frac{P \times c}{100} \quad (4)$$

式中, F 为沉降通量(kg·hm⁻²); P 为降雨量(mm); c 为雨水中总碳浓度(mg·L⁻¹)。

1.3.4 碳湿沉降对水体碳贡献量估算

碳湿沉降对水体碳贡献量采用式(5)进行计算:

$$W = c \cdot P \cdot q \quad (5)$$

式中, W 为通过降雨向流域内输入的碳量(g); c 为雨水中碳的质量浓度(g·m⁻³); P 为降雨量(m³); q 为径流系数(表 2)。

表 2 径流输出系数^[17]

土地利用类型	林地	草地	耕地	水体
径流系数(q)	0.023 ~ 0.03	0.032 ~ 0.04	0.036 ~ 0.101	1

1.3.5 碳流失模数计算

流域雨季碳流失模数采用式(6)进行计算：

$$E = (Q_m \times c_c) / A \tag{6}$$

式中, E 为流域雨季月均碳流失模数 [$\text{g} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$]; Q_m 为雨季流域月均径流量 (m^3); 为 c_c 为流域碳平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); A 为流域面积 (km^2).

2 结果与分析

2.1 干湿季下碳湿沉降浓度变化

2.1.1 区域年降雨变化特征

研究区域所在市延安,近 60 年的降水统计显示,降雨主要集中在 7、8 月,其次 9 月和 6 月,共占全年降水 70% 左右^[18]. 图 2 为 2015 年、2016 年月降雨情况,全年降雨 299.98 mm,研究期间 7~9 月的降雨量占年总降雨量的 33.87%. 图 3 为 2015 年研究流域 7~9 月的降雨情况,本次研究集中在 7~9 月并依据降雨频率将 7、8 月划分为湿季,9 月为干季. 7 月降雨共 7 场,均为小雨; 8 月共 14 场,均为小雨; 9 月共 8 场,其中两场中雨,其余均为小雨. (小雨,日降雨量小于 10 mm,中雨为 10~25 mm,大雨为 25~50 mm,50 mm 以上为暴雨). 7 月最大日降雨量出现在 17 日,为 3.8 mm,月总降雨量 22 mm; 8 月最大日降雨量出现在 2 日,为 10 mm,月总降雨量 36.6 mm; 9 月最大日降雨量出现在 10 日,为 13.6 mm,月总降雨量 43 mm.

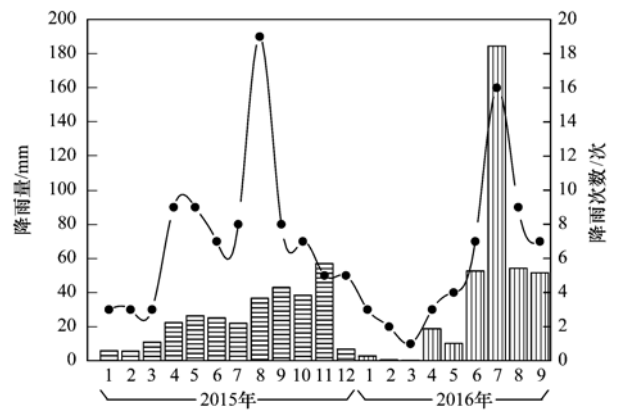


图 2 研究流域降雨情况
Fig. 2 Rainfall conditions of the watershed

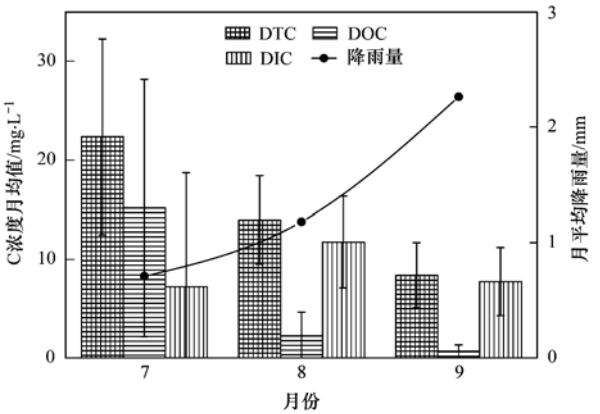


图 3 干湿季下雨水中碳浓度变化
Fig. 3 Variations in carbon concentration of rainwater during the wet and dry seasons

2.1.2 干湿季下碳沉降浓度变化

本研究共采集 14 场降雨:其中 7 月 4 场(降雨量分别为 3.8、9、0.6、2.4 mm); 8 月 7 场(降雨量分别为 7.4、10、0.8、2.2、4.4、2.4、4.2 mm); 9 月 3 场(降雨量分别为 13、5.1、13.6 mm). 图 3 为雨水中各形态碳浓度的月均值变化规律,7~9 月的 DTC 与 DOC 浓度月均值均呈递减趋势,其中 7 月平均 DOC、DIC 浓度达最高值依次为 $13.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $11.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 8 月 DIC 浓度处于最大值依次为 $2.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 9 月达 DOC 浓度最低值 $3.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 坝系流域湿季与干季的碳沉降月通量为 $3.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 如图 3 所示,雨水中的各形态溶解性碳浓度出现一定干湿季变化,7 月湿季中的 DOC 浓度大于 DIC 浓度.

2.2 流域碳输出变化特征

图 4 依次为 8 月 10 日、8 月 20 日、9 月 10 日、9 月 20 日依据流域不同土地利用方式的各形态碳浓度变化情况. 从中可以看出,DTC、DOC 与 DIC 浓度变化趋势均呈现先增加后降低的反复波动;湿季 DOC 浓度与 DIC 浓度相对波动平稳,干季相反;DOC 与 DIC 浓度差异极为明显.

流域 A 部分(1、2、3 采样点),8 月湿季的采集水样,DIC 浓度均明显高于 DOC 浓度,因为河流水体中 DOC 浓度与流域的化学侵蚀相关,随着气温、降雨、水文过程变化. 植物初级生产力与分解率共同控制水体 DOC 含量,A 部分土地利用类型为草

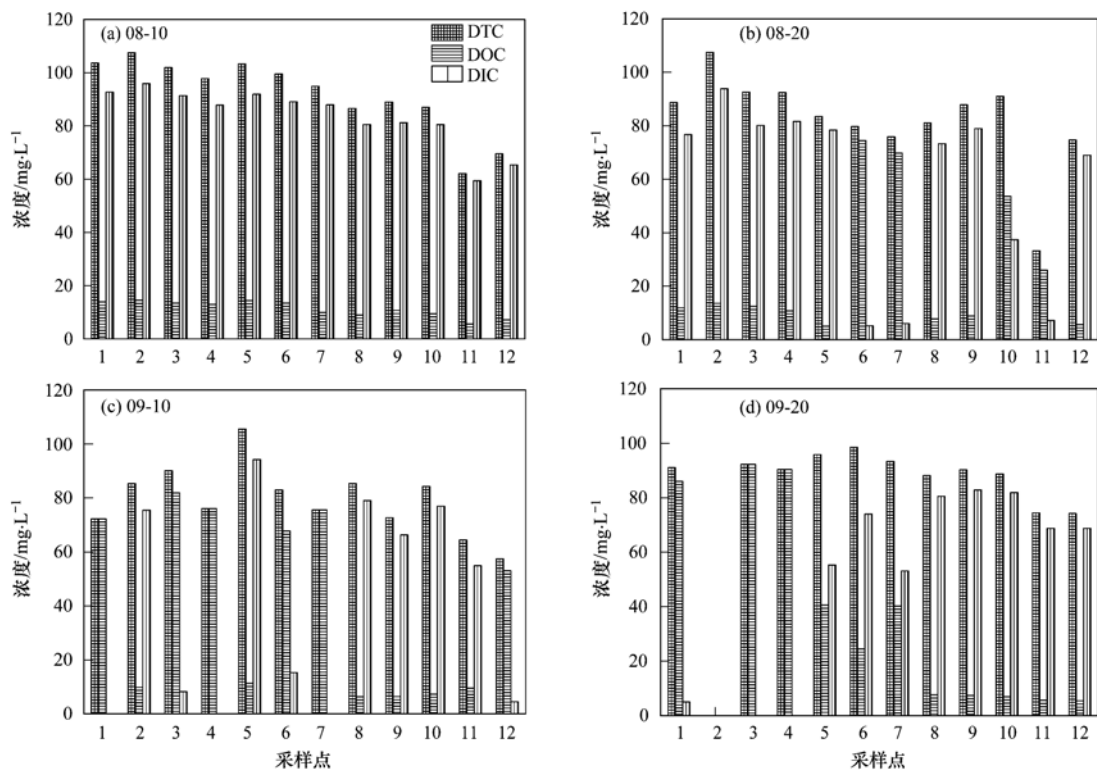


图4 流域不同形态碳干湿季变化特征

Fig. 4 Variations of different forms of carbon concentrations during the dry and wet seasons

地,初级生产力低.流域水体 DIC 含量主要受碳酸盐矿物溶解以及大气 CO_2 影响^[19~22]. 9 月干季采集的水样,1、3 号采样点 DIC 的浓度低于 DOC 浓度. 8 月末或 9 月初附近玉米地施肥的农业用水、放羊后的粪便与降雨之间等因素的综合作用. 9 月降雨特殊性也是一个原因,虽然有 2 次降雨量超过 10 mm,但降雨频率低,时间间隔长,雨水稀释效应小于流域水体的冲刷效应.

流域 B 部分(4、5、6 采样点),5、6 号采样点 DIC 的浓度明显高于 DOC 浓度,4 号采样点在干季出现相反情况. B 部分土地利用方式为林地,5 号为居民生活区,人类活动产生的生活污水、垃圾、粪便等流入水体会分解水体中的有机碳,从而使得 DOC 浓度降低. 4 号采样点有核桃树,施肥以及降雨会导致 DIC 的浓度显著低于 DOC 浓度.流域 C 部分(7、8、9、10 采样点),土地利用方式为水塘,其中生长着大量水生植物,8 月温度较高,利于植物生长,生产力较高但水体有机质氧化也十分迅速,因此 DOC 含量低. 8 月第二次采集的 7、10 号水样和 9 月第一次采集的 7 号水样,DOC 与 DIC 浓度相较其它时间和采样点浓度波动较大,由于期间雨水较为丰富,降雨中 DOC 含量高,降雨提高水池的流动性,使得 DOC 含量高于 DIC 含量.

流域 D 部分(11、12 采样点),DOC、DIC 浓度变化较大,11 号、12 号采样点附近有梯田大棚,11 号采样点附近为试验站,这些频繁的人类活动会增加 C 浓度波动变化. 农田施用有机肥料、居民的生活污水排放,使得 8 月第二次采集的 11 号水样和 9 月第一次采集的 12 号水样,出现 DOC 浓度高于 DIC 浓度,违背水体 DIC 浓度应该高于 DOC 浓度的常态.

如图 4 所示,湿季比干季的 DTC 波动范围大,8 月湿季 DTC 浓度范围为 $33.22 \sim 107.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,9 月干季 DTC 浓度范围为 $57.44 \sim 105.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,由于湿季降雨频繁所致;DOC 与 DIC 的浓度变化干湿季范围相差不大,依次为湿季 $4.68 \sim 74.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.42 \sim 86.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,干季 $5.22 \sim 93.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $4.44 \sim 94.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据监测点流域输出负荷计算公式得出,2015 年 8 月至 9 月,羊圈沟研究流域 DTC 输出量为 9.50 kg ,其中干湿季流域 DTC 输出量相差较小,湿季稍高为 4.76 kg ,干季为 4.74 kg ;DOC 输出量干季明显超过湿季,分别为 2.17 kg 、 0.96 kg ;DIC 干湿季输出量为 2.68 kg 、 3.79 kg . 降雨频率对 DIC 影响大,而降雨强度对 DOC 输出量影响更为明显.

2.3 次降雨条件过程碳输出动态特征

如图 5 所示,本研究选取 3 场不同强度的典型降雨事件对碳输出动态特征进行分析:8 月 2 日、8 月 25 日和 9 月 10 日降雨量依次为 10、4.2、13.6 mm. 其中 8 月 2 日和 8 月 25 日的 2 场降雨在降雨前期有明显的径流峰值,依次为 $1.33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,8 月 25 日降雨强度较小所以径流峰值出现延后的现象;9 月 10 日没有明显的径流峰值,当前两场降雨到后期径流量接近 0 时,9 月 10 号还显示明显的径流量,因为此日降雨持续时间长,总降雨量大的原因. 图 6 为不同形态碳随降雨径流过程的时间变化. 不同形态碳的浓度随着径流量的增加而增加,峰值出现后整体呈现下降趋势. 3 场降雨的 DTC 浓度变化范围较大,无规律性,最高值出现在 9 月 10 日为 $113.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (排除较大差异点);最低值出现在 8 月 25 日为 $46.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;DIC 浓度变化趋势与 DTC 一致,9 月 10 日的 DIC 波动范围最大,因此日降雨强度大,受径流影响较大. DIC 浓度较 DOC 浓度值高,这与水体本身 DIC 含量较 DIC 含量高,并且径流冲刷土壤,使得土壤碳酸盐成分溶于水体有关;3 场降雨的 DOC 波动较为平缓,8 月 2 日的 DOC 浓度要高于其他两场降雨,最高值达 $12.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与附近农田施肥有关. 最低值出现在 8 月 25 日仅为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

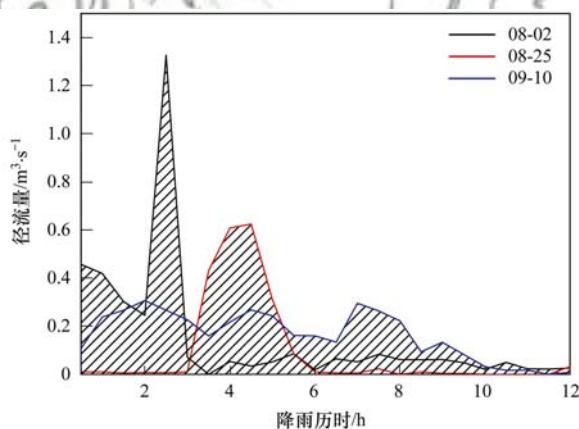


图 5 3 场降雨径流过程的径流量

Fig. 5 Volume of runoff for three rainfall events

2.4 降雨径流碳输出特征

如表 3 所示,8 月降雨径流中溶解性总碳输出负荷为 $944.89 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,其中 DOC 输出负荷 $523.36 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,DIC 输出负荷 $421.53 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$;9 月降雨径流 DTC 输出负荷为 $300.29 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,其中 DOC 输出负荷 $69.15 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,DIC 输出负荷

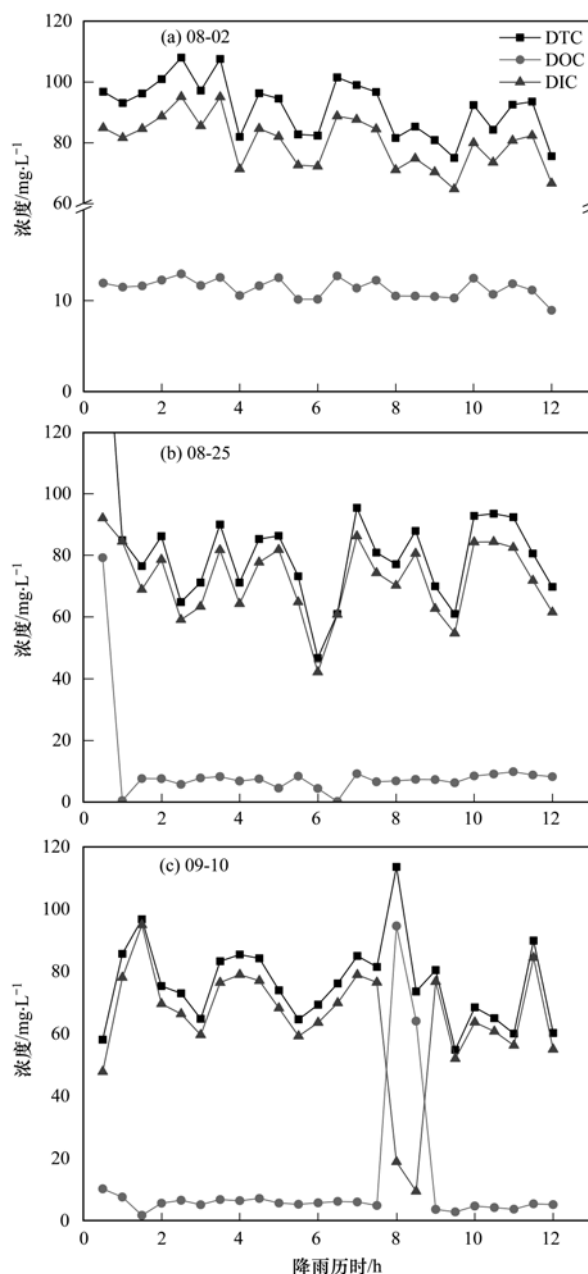


图 6 不同形态碳随降雨历时变化

Fig. 6 Variation in different forms of carbon concentrations for different rainfall events

$231.14 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. 8 月 DOC 输出负荷明显高于 DIC 输出负荷,而 9 月二者输出负荷大小则相反,此外 8 月总碳输出负荷远超过 9 月输出负荷. 本次研究的 8 场自动径流采样中,6 次为小雨强条件下的径流样、2 次为中雨强条件下的径流样. 中等雨强下的碳流失量明显高于小雨强碳流失量;其中小雨强条件下平均碳流失负荷为 $129.89 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,中雨强条件下平均碳流失负荷为 $284.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ (因 9 月 10 号测量数据有误差,因此计算中未将其未考虑进去).

表 3 降雨径流中碳流失负荷

Table 3 Output load of carbon loss in rainfall runoff

日期	降雨/mm	总径流/m ³	碳流失负荷/kg
2015-08-01	7.4	2.84	190.79
2015-08-02	10	4.09	596.80
2015-08-03	0.8	3.20	483.86
2015-08-11	4.4	2.25	304.49
2015-08-14	2.4	0.40	15.64
2015-08-25	4.2	2.70	317.10
2015-09-04	13	0.77	53.61
2015-09-10	13.6	4.78	552.98

表 4 不同降雨事件下各形态碳的径流输出负荷

Table 4 Output load of different C forms under different precipitation conditions

日期	降雨/mm	总径流/m ³	DTC/kg	DOC/kg	DIC/kg
2015-08-25	4.2	2.67	317.09	28.19	288.90
2015-08-02	10	4.09	596.80	72.90	523.90
2015-09-10	13.6	4.78	552.97	86.06	466.91
平均	9.27	3.85	488.95	62.38	426.57
总量	27.8	11.56	1 466.86	187.15	1 279.71

3 讨论

3.1 降雨径流对流域碳流失贡献

8 月总碳输出负荷远超出 9 月输出负荷,这与 8 月频繁的降雨直接相关,8 月 DOC 输出负荷高于 DIC 输出负荷,可能由于取样前后附近农田有机肥的施用造成. 9 月的 DIC 输出负荷较 DOC 输出负荷高,这取决于黄土高原水体本身属性,正常情况下 DIC 浓度高于 DOC 浓度,主要由于碳酸盐作为黄土的重要组成部分,随着降雨冲刷土壤,溶解于径流中,从而提升径流中 DIC 浓度. 干湿季径流中碳输出负荷均远大于流域水体中的碳输出负荷,即土壤碳随径流流失占主导地位,此外本研究中碳流失量均指溶解性碳,实际上径流中碳还以泥沙态、颗粒态流失,因此实际碳流失量要大于此次研究量,也进而体现黄土高原防治水土流失、土壤侵蚀的重要性.

降雨径流中的碳主要包括土壤碳流失部分、碳湿沉降部分. 以下是碳湿沉降对流域各形态碳流失贡献的讨论:根据式(5)计算,得出羊圈沟小流域内次降雨事件中碳对河流贡献量:7 月采集 4 场降雨,碳沉降通过土壤截留后向流域输入的总碳量为 21.25 kg; 8 月收集 7 场降雨对流域河流的贡献量为 15.93 kg; 9 月 3 场降雨对河流的碳输入量为 12.14 kg. 雨水中碳对流域水体贡献量的月变化与降雨中碳浓度月变化情况一致,降雨中碳浓度变化受多方面因素影响,例如,气压、风向、降雨过程、

表 4 列出 3 场不同雨强的典型降雨事件,径流量均随着降雨量的增加而增加,各形态碳的流失负荷也均随径流量的增大而增大,呈现一定的线性关系. 并且如图 5 所示,雨强大的降雨事件,产流的时间也较早. 3 场降雨的径流总量为 11.56 m³,溶解性总碳的输出负荷为 1 466.86 kg, DOC 输出符合为 187.15 kg, DIC 输出负荷为 1 279.71 kg,分别占可溶性总碳的 12.76%、87.24%. 降雨径流对可溶性碳流失的贡献,主要以溶解性无机碳形式输出.

大气中有机污染物及悬浮颗粒物等^[23,24]. 7 月雨水碳贡献量最高,可能由于 7 月进入雨水丰沛期,植物也进入生长旺盛期,向大气中排放的挥发性有机物,易溶于水从而导致 DOC 浓度升高,提高总碳浓度值;另一方面可能由于 9 月虽然月初降雨强度大但是与后期降雨间隔时间长,此时大气中聚集的微小建筑灰尘及尘土颗粒(含有大量碳酸盐成分),在雨水中可以溶解并释放碳酸根离子,从而增加雨水的 DIC 浓度,但 9 月植物已进入衰败期,总碳浓度为最低. 8 月降雨频率较高,雨水碳浓度进入湿季后受空气中颗粒影响较小,植物生长较稳定,各形式碳浓度均处于中等水平,进而对水体碳贡献量也位于中间位置.

3.2 流域碳输出量评估

根据表 3 所列典型次降雨事件的径流土壤碳输出负荷对流域次降雨条件下溶解性土壤碳输出量进行评估:羊圈沟流域的小次降雨事件流域溶解性碳输出量为 156.98 kg·km⁻²,中等雨强降雨事件流域碳输出 284.60 kg·km⁻². 研究区域所处延安市面积仅占黄土高原面积的 5.8%,因其具备典型坝系流域特点因此可以进行尺度推移. 延安市总流域面积为 7 725 km²,由此推算:整个延安流域的小、中等雨强降雨条件下的径流溶解性碳输出量分别达 1 212.63 t、2 198.51 t. 流入水体中碳有 20% 碳释放回大气,则羊圈沟小流域 8、9 月依次有 381.74 kg、300.29 kg 碳返回大气. 由于侵蚀作用导致有机碳矿化形成 CO₂ 排放到大气,也是温室气体的一个

来源^[25]。流域水体的碳输送量大多来自土壤侵蚀作用,能够反映出流域的侵蚀状况,因此对流域碳流失评估具有重要意义。黄土高原6、7、8、9月为雨季,根据公式(6)计算羊圈沟流域雨季月均碳流失模数为 $1.89 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$,则由此评估研究区域年碳流失模数为 $2.70 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,其中无机碳流失模数为有机碳流失模数的近3倍。由于研究区域自“退耕还林”政策以来景观已有大幅度改善,因此此评估结果从整体流域面积及侵蚀程度比例来看,较早年研究黄河流域 DOC 流失模数 $0.48 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 评估结果的碳流失程度已有大幅度减轻^[26]。但由于气候变化、人类活动及地貌形态的影响,黄土高原西北部生态环境依然脆弱、水土流失及土壤侵蚀危害严重^[27],因此对于黄土高原更应迫切研究因地制宜的水土保护措施。本研究主要针对流域、径流中可溶性碳进行分析,此外颗粒态、泥沙态碳也是流域水体、径流的重要组分,并且径流中土壤细小颗粒携带碳最多^[27,28],因此实际径流导致的 C 输移量上应在本研究评估值之上。

4 结论

(1) 流域中8月 DTC 浓度范围为 $33.22 \sim 107.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,9月 DTC 浓度范围为 $57.44 \sim 105.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,主要由于湿季降雨频繁导致差异;坝系流域湿、干季碳沉降月通量分别为 $3.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,干湿季碳沉降存在一定变化但对流域碳输出贡献较小。

(2) 8、9月降雨径流中溶解性总碳输出负荷为 $944.89 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $300.29 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,其中8月 DOC 输出负荷高于9月,而 DIC 输出负荷相反。

(3) 径流量及碳流失量均随降雨强度增大而增大,小次降雨事件径流中溶解性碳输出量为 $156.98 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,中等雨强降雨事件碳输出 $284.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$;羊圈沟流域雨季月均碳流失模数为 $1.89 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{mon})^{-1}$,评估得出研究区域年碳流失模数为 $2.70 \text{ kg} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 西北黄土高原区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 28-59.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Water loss and soil erosion and ecological security of China: the loess plateau[M]. Beijing: Science Press, 2010. 28-59.
- [2] 张岩,朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 99-103.
- [3] Zhang Y, Zhu Q K. Statistic analysis of erosive rainfall on the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 99-103.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink [J]. BioScience, 2007, 57(4): 337-346.
- [6] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003, 29(4): 437-450.
- [7] 徐彩丽,罗春乐,薛跃君,等. 山东省降雨和降雪中溶解有机碳、溶解无机碳和总氮的浓度变化及来源分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 658-666.
- [8] Xu C L, Luo C L, Xue Y J, et al. Concentration and source assessment of dissolved organic and inorganic carbon and dissolved nitrogen in snow and rainfalls in Shandong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 658-666.
- [9] 贾松伟,贺秀斌,陈云明,等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 88-90.
- [10] Jia S W, He X B, Chen Y M, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss on the loess hilly areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 88-90.
- [11] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 47(3-4): 291-302.
- [12] 张雪,李忠武,申卫平,等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 465-473.
- [13] Zhang X, Li Z W, Shen W P, et al. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 465-473.
- [14] 王文欣,庄义琳,庄家尧,等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 62-66.
- [15] Wang W X, Zhuang Y L, Zhuang J Y, et al. Effects of downhill coverage on soil organic carbon loss under different rainfall intensities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 62-66.
- [16] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012-2030年)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013. 1-10.
- [17] 刘春利,杨勤科,谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 850-857.
- [18] Liu C L, Yang Q K, Xie H X. Spatial and temporal distributions of rainfall erosivity in the Yanhe River Basin[J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 850-857.
- [19] 汪亚峰,傅伯杰,陈利顶,等. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于¹³⁷Cs 示踪的定量评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [20] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Effects of land use change on soil erosion intensity in small watershed of Loess Hilly Region: a quantitative evaluation with ¹³⁷-Cesium tracer [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [21] 文雯,周宝同,汪亚峰,等. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J]. 生态学报, 2015, 35

- (18): 6060-6069.
- Wen W, Zhou B T, Wang Y F, *et al.* Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6060-6069.
- [15] 贾琰杰, 高扬, 陈维梁, 等. 黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 147-155.
- Jia J J, Gao Y, Chen W L, *et al.* Characteristics of nitrogen transport and its source trace in Loess Plateau's dam watershed under wet and dry season: a case study of Yangjuangou watershed [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 147-155.
- [16] 郝卓, 高扬, 张进忠, 等. 南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1630-1638.
- Hao Z, Gao Y, Zhang J Z, *et al.* Characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition and associated impact on N transport in the watershed of red soil area in Southern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1630-1638.
- [17] 陈世博, 汪亚峰, 高扬, 等. 黄土高原磷湿沉降特征及其对坝系流域磷输出影响——以羊圈沟为例[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 721-728.
- Chen S B, Wang Y F, Gao Y, *et al.* Characteristics of phosphorus wet deposition in the Loess Plateau and its effect on the phosphorus export in the dam watershed: a case study of Yangjuangou Watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 721-728.
- [18] 李斌, 王莉. 延安近60年降水量的统计分析[J]. *陕西水利*, 2015, (1): 126-129.
- Li B, Wang L. Statistical analysis of precipitation in the past 60 years in Yan'an [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2015, (1): 126-129.
- [19] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及DIC来源[J]. *地理学报*, 2007, **62**(7): 764-775.
- Li T T, Ji H B, Jiang Y B, *et al.* Hydro-geochemistry and the sources of DIC in the upriver tributaries of the Ganjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(7): 764-775.
- [20] 陈忠, 马海州, 曹广超, 等. 黄土碳酸盐的研究[J]. *盐湖研究*, 2006, **14**(4): 66-72.
- Chen Z, Ma H Z, Cao G C, *et al.* Study on carbonates in Loess: a review[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, **14**(4): 66-72.
- [21] 郭威, 李祥忠, 刘卫国. 西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1291-1297.
- Guo W, Li X Z, Liu W G. Study on the content and carbon isotopic composition of water dissolved inorganic carbon from rivers around Xi'an city [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1291-1297.
- [22] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. *地理学报*, 2015, **70**(9): 1503-1515.
- Gao H D, Li Z B, Li P, *et al.* The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(9): 1503-1515.
- [23] Willey J D, Kieber R J, Eyman M S, *et al.* Rainwater dissolved organic carbon: concentrations and global flux [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(1): 139-148.
- [24] Didyk B M, Simoneit B R T, Pezoa L A, *et al.* Urban aerosol particles of Santiago, Chile: organic content and molecular characterization [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(8): 1167-1179.
- [25] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, *et al.* Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, **154**: 102-122.
- [26] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow rivers (China) [J]. *Marine Chemistry*, 1993, **43**(1-4): 235-246.
- [27] 裴会敏, 许明祥, 李强, 等. 侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展[J]. *水土保持研究*, 2012, **19**(6): 269-274.
- Pei H M, Xu M X, Li Q, *et al.* Advances in soil organic carbon Losses under erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, **19**(6): 269-274.
- [28] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)