

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                               |                                               |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1960~2013年我国霾污染的时空变化 .....                                    | 符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)                          |
| 太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 .....                              | 王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)                     |
| 石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 .....                               | 刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258) |
| 南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 .....                                  | 吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)        |
| 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 .....                                    | 肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)                         |
| 上海崇明地区大气分形态汞污染特征 .....                                        | 李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)                |
| 三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 .....                              | 王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)                |
| 长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 .....                               | 吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)                      |
| 铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 .....                                   | 刘大钧,汪家权 (3315)                                |
| 祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 .....                                    | 贾文雄,李宗省 (3322)                                |
| 三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 .....                           | 郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)                |
| 太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 .....                                | 车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)                     |
| 太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 .....                             | 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)          |
| 岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 .....                                   | 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)                       |
| 西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 .....                     | 詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)           |
| 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 .....                              | 李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)                        |
| 滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 .....                                   | 李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)                  |
| 荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 .....                        | 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)          |
| 富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 .....                                    | 张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)                   |
| 基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 .....            | 安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)                  |
| 于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 .....                             | 王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)                |
| 人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 .....                              | 刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)                         |
| 共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 .....                                   | 许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)                   |
| 模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 .....                                   | 王兵,温奋翔,肖波 (3447)                              |
| 对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 .....                                     | 周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲峰,张振国,展惠英 (3453)                  |
| 多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 .....                                  | 尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)                     |
| 某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究 .....                                  | 吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)                         |
| Fe <sup>0</sup> -PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 .....                 | 卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)                    |
| EDTA-nSiO <sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd <sup>2+</sup> 的吸附 .....       | 蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)        |
| 硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 .....                             | 沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)                    |
| 人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 .....                                       | 崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)                         |
| 生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 .....                                     | 牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)              |
| 甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 .....                              | 刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)                     |
| 光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 .....                                       | 胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)                        |
| 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 .....                                  | 王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)                             |
| 北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 .....                           | 董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)                      |
| 红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 .....                                      | 贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)     |
| 外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应 .....                                       | 辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)                  |
| 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 .....                                 | 杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)               |
| 生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 .....                          | 周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)                   |
| 长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 .....                             | 赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)                       |
| 应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 .....                      | 曾清苹,何丙辉 (3590)                                |
| 三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 .....                             | 隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)      |
| 外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... | 胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)                          |
| 模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO <sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 .....               | 杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)       |
| 太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 .....                                | 严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)                         |
| 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 .....                                  | 王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)         |
| 氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 .....                                  | 辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)                          |
| 冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 .....                                    | 李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)                             |
| 堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 .....                                     | 李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)              |
| 酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 .....                                       | 刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)                             |
| 《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289,3321,3422)       |                                               |

# 模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素

杜兰兰<sup>1</sup>, 王志齐<sup>1</sup>, 王蕊<sup>2</sup>, 李如剑<sup>1</sup>, 吴得峰<sup>2</sup>, 赵慢<sup>2</sup>, 孙棋棋<sup>3</sup>, 高鑫<sup>1</sup>, 郭胜利<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:** 了解土壤侵蚀与沉积对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响有助于正确评价侵蚀区域土壤和大气之间 CO<sub>2</sub> 交换过程与机制。本试验于 2014 和 2015 年雨季(7~9 月)在长武农田生态系统国家野外站进行, 利用土壤碳通量测量系统 LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 和土壤温度及水分数据采集器 (EM50, DECAGON, USA), 测定侵蚀和沉积地貌下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量、土壤水分和温度, 并采集径流泥沙。结果表明: ①侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量均值依次为 1.05 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup> 和 1.38 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 沉积区较侵蚀区增幅达 31% ( $P < 0.05$ ); 沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感性(8.14)是侵蚀区(2.34)3 倍以上。②侵蚀区与沉积区土壤水分均值分别为 0.21 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup> 和 0.25 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>, 沉积区较侵蚀区提高 19% ( $P < 0.05$ )。尽管侵蚀区较沉积区土壤温度稍有提高(7%), 但差异不显著。③泥沙中有机碳平均含量(7.26 g·kg<sup>-1</sup>)较试验之初(6.83 g·kg<sup>-1</sup>)提高 6%。④土壤水分和土壤有机碳(SOC)在侵蚀区和沉积区的重新分布对土壤 CO<sub>2</sub> 通量空间变异有重要影响。

**关键词:** 侵蚀区; 沉积区; 土壤 CO<sub>2</sub> 通量; 土壤水分; SOC; 土壤温度; 径流泥沙

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3616-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.045

## Variation of Soil CO<sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment

DU Lan-lan<sup>1</sup>, WANG Zhi-qi<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, LI Ru-jian<sup>1</sup>, WU De-feng<sup>2</sup>, ZHAO Man<sup>2</sup>, SUN Qi-qi<sup>3</sup>, GAO Xin<sup>1</sup>, GUO Sheng-li<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> flux from soil is an important component of global carbon cycle, and a small variation of soil CO<sub>2</sub> flux can prominently influence atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and soil organic carbon stock. Soil erosion significantly influences soil CO<sub>2</sub> emission. However, the process of soil CO<sub>2</sub> flux during soil erosion and soil deposition remains uncertain. At the present study, a simulated experiment on soil erosion and deposition was conducted at Changwu State Key Agro-Ecological Station, Shaanxi, China. From July to September in 2014 and 2015, soil CO<sub>2</sub> flux was periodically measured using an automated CO<sub>2</sub> flux system LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) and soil temperature and moisture were collected by series data collection system of soil temperature and soil moisture (EM50, DECAGON, USA). The measurement frequency of soil CO<sub>2</sub> flux was once a week during 09:00 and 11:00. Soil temperature and soil moisture of 10 cm topsoil were measured continuously (at an interval of 30 minutes) during the experiment. At the same time, runoff and sediment were collected as well in each rain event, and then SOC content in sediment was measured. The results showed that soil CO<sub>2</sub> flux between erosion and deposition sites had a significant difference ( $P < 0.05$ ), and soil CO<sub>2</sub> flux at deposition site [mean value 1.38 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>] was 31% higher than that of soil CO<sub>2</sub> flux at erosion site [1.05 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>], while temperature sensitivity at deposition site ( $Q_{10}$ : 8.14) was 3 times as high as that at erosion site (2.34). Soil moisture at deposition site was 19% higher than that at erosion site ( $P < 0.05$ ). Soil temperature was slightly higher at erosion site. The average SOC content (7.26 g·kg<sup>-1</sup>) increased by 6% in the sediment compared with the initial SOC content (6.83 g·kg<sup>-1</sup>). Soil moisture and SOC redistribution across erosion and deposition sites were influencing factors for soil CO<sub>2</sub> flux under erosional environment. In conclusion, soil CO<sub>2</sub> flux showed a significant variation at erosion site and deposition site. Changes in soil moisture and SOC contributed much to the difference in soil CO<sub>2</sub> flux across erosion and deposition sites.

**Key words:** erosion site; deposition site; soil CO<sub>2</sub> flux; soil moisture; SOC; soil temperature; runoff and sediment

陆地生态系统在全球碳库收支平衡中起重要作用<sup>[1]</sup>。土壤 CO<sub>2</sub> 的排放是调控陆地生态系统碳循环的重要生态过程, 其微小波动将会影响全球碳库的

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371279)

作者简介: 杜兰兰(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀, E-mail: llxbnlkjdx510@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

动态变化<sup>[2]</sup>. 土壤侵蚀过程显著影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量,严重的土壤侵蚀可能改变陆地生态系统碳平衡<sup>[3]</sup>. 了解土壤 CO<sub>2</sub> 通量对土壤侵蚀的响应有助于准确评估全球陆地生态系统碳平衡<sup>[4]</sup>.

土壤侵蚀可通过多种途径影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量. 首先,降雨过程中受雨滴击打和地表径流冲刷,土壤团聚体崩解分裂<sup>[5]</sup>,使包裹在其中的土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)暴露,加速 SOC 的矿化分解,提高土壤 CO<sub>2</sub> 通量. 其次,土壤侵蚀和沉积导致泥沙在不同地貌单元的再分布影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量. 在土壤侵蚀和沉积过程中,泥沙对 SOC 具有承载作用<sup>[5-7]</sup>,最高可以达到 95% 以上<sup>[6]</sup>,这使得 SOC 空间分布发生变化,而 SOC 是土壤微生物呼吸的重要底物,其空间变异将会对土壤 CO<sub>2</sub> 通量产生影响. 此外,土壤侵蚀通过影响土壤温度和水分影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量;Wei 等<sup>[8]</sup>认为侵蚀和沉积作用显著影响土壤温度与土壤水分,造成土壤 CO<sub>2</sub> 通量之间的显著差异. 目前,关于土壤侵蚀对土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响的研究存在较大争议<sup>[9,10]</sup>. 有研究认为土壤侵蚀导致侵蚀区大量 SOC 搬运到沉积区,使 SOC 被泥沙埋藏,其矿化分解作用受到抑制,使得每年有近 0.6 ~ 1.5 Pg 的 SOC 不能被分解和矿化而固存在土壤中形成碳汇<sup>[11,12]</sup>,从而导致土壤 CO<sub>2</sub> 通量速率显著降低,减少了土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的量;也有研究指出土壤侵蚀加速 SOC 矿化分解致使全球每年产生 0.8 ~ 1.2 Pg 的碳源<sup>[4]</sup>,这有效提高了土壤 CO<sub>2</sub> 通量速率,使得土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的量显著增加. 通过查阅文献发现,从侵蚀和沉积角度出发结合土壤温度、水分和径流泥沙等因子对土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响的研究相对较少.

黄土高原是土壤侵蚀最为严重的地区之一,水土流失面积  $4.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占全区土地总面积( $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ )的 70.9%<sup>[13]</sup>,研究该区域侵蚀地貌单元对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响有助于准确评估侵蚀区域土壤碳循环. 本研究模拟黄土高原沟壑区的侵蚀-沉积地貌,测定土壤 CO<sub>2</sub> 通量,土壤水分和温度,采集降雨后径流泥沙,探讨了侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征,并重点分析了土壤水分和 SOC 在侵蚀和沉积部位的分布差异对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2014 年 7 月 ~ 2015 年 9 月在中国科学

院长武黄土高原农业生态试验站进行,该站位于陕西省长武县( $35^\circ 12' \text{N}$ ,  $107^\circ 40' \text{E}$ ),海拔 1 200 m,属于典型的黄土旱塬区,塬面地势平坦,沟坡地带沟壑纵横,支离破碎. 研究区属大陆季风气候,1984 ~ 2014 年间年均降雨量为 577.4 mm,其中最高年份为 954.2 mm,最低年份为 296.0 mm,7 ~ 9 月降雨量占年总量的 49% 左右,年平均蒸发量为 1 565 mm. 2014 年的年均气温为 10.20℃,7 ~ 9 月的平均气温为 19.55℃(12.25 ~ 27.69℃),降雨量为 344.6 mm,降雨 35 次,占年总降雨量(596.8 mm)的 58%. 2015 年 7 ~ 9 月的平均气温为 16.62℃,最高气温 24.00℃,最低气温 9.80℃,7 ~ 9 月降雨 29 次,降雨量为 235.1 mm,平均单次降雨量为 8.1 mm.

地带性土壤为黏壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松. 土壤容重为  $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,土壤田间持水量为 27.3% ~ 30.9%,凋萎含水量为 11.7% ~ 15.6%(质量含水量). 土壤肥力指标为: SOC  $6.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $37.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $129.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

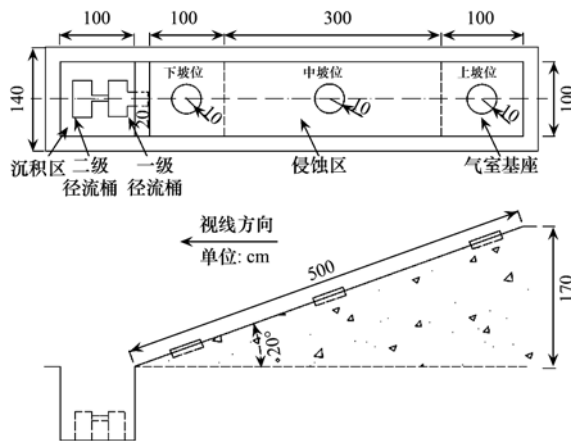
### 1.2 试验设计

试验小区于 2014 年 5 月修建,坡向朝东,坡度 20°(黄土高原地区陡坡耕种普遍,20° 坡是土壤侵蚀研究中的临界坡度<sup>[5-7]</sup>),设置 4 个重复(4 个重复中,第一个用于径流泥沙的研究,沉积区设有径流桶,其它 3 个重复的沉积区不设径流桶,用于测定沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量). 分为侵蚀区和沉积区两部分,侵蚀区包括上、中、下这 3 个坡位,代表不同的侵蚀深度,坡长 5 m,宽 1 m,高 1.7 m,沉积区面积为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . 径流桶与小区相连置于沉积区以收集径流泥沙,该装置采用分流方式收集径流泥沙,整体由两个长方体径流桶组成( $49 \text{ cm} \times 25.5 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$ ),在第一个径流桶(一级径流桶)距桶顶 5 cm 处,设有 9 个等孔径分水孔,中间一孔通向第二个径流桶(二级径流桶),其余 8 孔左右排列,使泄水畅通外流,以便在产流产沙较多的情况下能够准确计算所有径流和泥沙量(图 1).

供试土壤为当地塬面黑垆土,去除植物残体和根系,过 2 cm 筛后分层填装,每层 5 cm,共 17 层,试验小区底部土壤与试验地土壤自然接合. 依据当地坡面自然土壤物理特性,试验土壤容重为  $1.2 \sim 1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,土壤含水质量分数为 12% ~ 15%.

试验土壤稳定 3 个月后,在侵蚀区(上、中、下)和沉积区分别安装外径 20 cm,高 6 cm 的气室

基座,气室基座露出地面 1 cm,用于测定土壤 CO<sub>2</sub> 通量(图 1)。同时,在各气室基座处安装土壤温度 and 水分数据采集器探针,埋深 10 cm,以测定土壤水分和温度。



试验小区有 4 个重复,在此仅以第 1 个重复为例进行试验布设说明;沿视线方向为自西向东

图 1 试验小区布设示意

Fig. 1 Diagram of experimental plot

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量

为避免由于安置气室基座对土壤扰动而造成的短期土壤 CO<sub>2</sub> 通量波动,在气室基座安置 24 h 后再利用便携式土壤碳通量测量系统 LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 进行土壤 CO<sub>2</sub> 通量测定。试验于 2014 年 7 月 28 日开始,选择晴好天气于 09:00 ~ 11:00 进行土壤 CO<sub>2</sub> 通量的测定<sup>[14]</sup>,测定前去除气室基座内的一切活体,约每周测定 1 次,降雨后适当提高测定频率。在本研究中,气室基座对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响主要有两方面:一方面,安置或拔出气室基座将会扰动周围的土壤,从而对土壤 CO<sub>2</sub> 通量产生影响;另一方面,在降雨事件中,安置在坡地上的气室基座将会阻碍降雨及地表径流对土壤的侵蚀作用。为减少气室基座对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响,在试验过程中采取以下措施:①在无降雨时段内不随意移动气室基座,以免扰动周围土壤;②降雨来临前拔走基座,降雨结束后重新安置基座,以减少基座对降雨及径流侵蚀作用的影响。

#### 1.3.2 土壤水分、土壤温度、径流泥沙量、SOC 含量及降雨量的测定

土壤水分(土壤体积含水量)及土壤温度均采用土壤温度和水分数据采集器(EM50, DECAGON, USA)连续监测,每 30 min 对土壤水分及温度进行一次测定。降雨产生径流后,首先,测量径流桶中径

流深,以计算总径流泥沙量;其次,将径流桶中的径流泥沙混合均匀,并利用 1 000 mL 的铝盒从中取样,3 次重复;最后,将径流泥沙样静置于阴凉处,待泥沙完全沉淀后利用洗耳球将上清液移除,风干称重,以分析计算泥沙重量。取泥沙干样并采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 外加热法<sup>[15]</sup>测定次降雨泥沙中 SOC 的含量,3 个重复(试验初采取土壤样品 3 个,以测定土壤中 SOC 含量,测定方法同泥沙样中 SOC 含量的测定方法)。降雨量数据通过气象站获取(试验小区位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站气象站正南方向,距离 80 m)。

### 1.4 数据处理与分析

利用 SigmaPlot 软件制作相关的基础图件。采用 SAS (SAS 9.1, SAS Institute) 软件分别对侵蚀区和沉积区的土壤 CO<sub>2</sub> 通量,土壤温度和土壤水分进行方差分析,用以比较土壤 CO<sub>2</sub> 通量,土壤温度和土壤水分在侵蚀区与沉积区的差异。在评价环境因子对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响时,利用指数关系模拟土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度的关系<sup>[16]</sup>,二次抛物线模拟土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分的关系<sup>[17]</sup>。

#### 1.4.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度、土壤水分的相关性计算

(1) 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度的关系采用指数关系:

$$R = \beta_0 e^{\beta_1 T} \quad (1)$$

式中, $R$ :土壤 CO<sub>2</sub> 通量 [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ];  $T$ :土壤 10 cm 的温度 (°C);  $\beta_0$ :反映基础土壤 CO<sub>2</sub> 通量高低的参数,与土壤生物性状有关;  $\beta_1$ :土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感性的参数。

(2) 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分的关系采用二次函数关系:

$$R = \beta_2 \theta^2 + \beta_3 \theta + \beta_4 \quad (2)$$

式中, $R$ :土壤 CO<sub>2</sub> 通量 [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ];  $\theta$ :土壤水分 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$  为常数。

#### (3) 土壤 CO<sub>2</sub> 通量敏感性的计算

土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感系数 ( $Q_{10}$ ), 表示温度每升高 10°C, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量所增加的倍数。计算公式为:

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (3)$$

式中, $Q_{10}$ :土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感系数;  $\beta_1$ :由方程 (1) 求得。

#### 1.4.2 径流深度、径流系数、泥沙重量的计算

(1) 径流深度 ( $h$ ):次降雨在侵蚀坡面产生的

径流平均深度, 计算式为:

$$h = \frac{s_0 h_0}{1\,000s}$$
 (4)

式中,  $h$ : 径流深度(mm);  $s_0$ : 径流桶底面积( $\text{cm}^2$ ), 径流桶底面积( $\text{cm}^2$ ) = 径流桶长(cm) × 径流桶宽(cm);  $h_0$ : 径流深(cm), 径流桶内液面高度;  $s$ : 侵蚀坡面面积( $\text{m}^2$ ), 侵蚀坡面面积( $\text{m}^2$ ) = 侵蚀坡面长(m) × 侵蚀坡面宽(m).

(2) 径流系数( $\alpha$ ): 指一定汇水面积内总径流量与降雨量的比值, 计算式为:

$$\alpha = \frac{h}{P}$$
 (5)

式中,  $\alpha$ : 径流系数;  $h$ : 径流深度(mm), 由式(4)可知;  $P$ : 降雨量(mm).

(3) 泥沙重量( $m$ ): 指次降雨产生的径流所携带泥沙的干重, 计算式为:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m_{i0}}}{n} \cdot M$$
 (6)

式中,  $m$ : 次降雨后总泥沙重量(kg);  $i$ : 次降雨后第  $i$  个径流泥沙样;  $n$ : 次降雨后所取径流泥沙的总样本数;  $m_i$ : 次降雨后第  $i$  个径流泥沙样经风干处理后的泥沙重量(kg);  $m_{i0}$ : 次降雨后第  $i$  个径流泥沙样的重量(kg);  $M$ : 次降雨产生的总的径流泥沙的重量(kg).

2 结果与分析

2.1 侵蚀区和沉积区土壤温度、土壤水分的变化特征

2014 年和 2015 年试验期间, 侵蚀区土壤温度大于沉积区 ( $23.12^\circ\text{C} > 21.69^\circ\text{C}$ ), 且随时间推移二者间差异程度逐渐减小 [图 2(c)]. 2014 年侵蚀区平均土壤温度 ( $24.06^\circ\text{C}$ ) 较沉积区 ( $22.53^\circ\text{C}$ ) 提高 7%, 变化范围分别为  $15.38 \sim 30.50^\circ\text{C}$  和  $15.88 \sim 27.65^\circ\text{C}$ ; 2015 年侵蚀区平均土壤温度 ( $22.18^\circ\text{C}$ ) 较沉积区 ( $20.85^\circ\text{C}$ ) 提高 6%, 变化范围分别为  $12.15 \sim 30.46^\circ\text{C}$  和  $13.27 \sim 26.81^\circ\text{C}$  (表 1).

与土壤温度变化不同, 受降水频率及降水量的影响, 2014 年与 2015 年土壤水分变化特征不同. 2014 年土壤水分动态变化呈上升趋势, 变化幅度较大, 侵蚀区土壤水分的变化范围为  $0.09 \sim 0.29 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , 沉积区为  $0.19 \sim 0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ; 而 2015 年土壤水分动态变化趋势较平缓, 侵蚀区和沉积区依次为  $0.18 \sim 0.26 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  和  $0.23 \sim 0.30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  [图 2(b)]. 试验期间(表 1): 沉积区平均土壤水分 ( $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) 较侵蚀区 ( $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) 提高 19%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 2014 提高 15% ( $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} > 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ), 2015 年提高 29% ( $0.27 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} > 0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ).

表 1 侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量及其环境因子对比

Table 1 Comparison of soil CO<sub>2</sub> flux and environmental factors between the erosion site and the deposition site

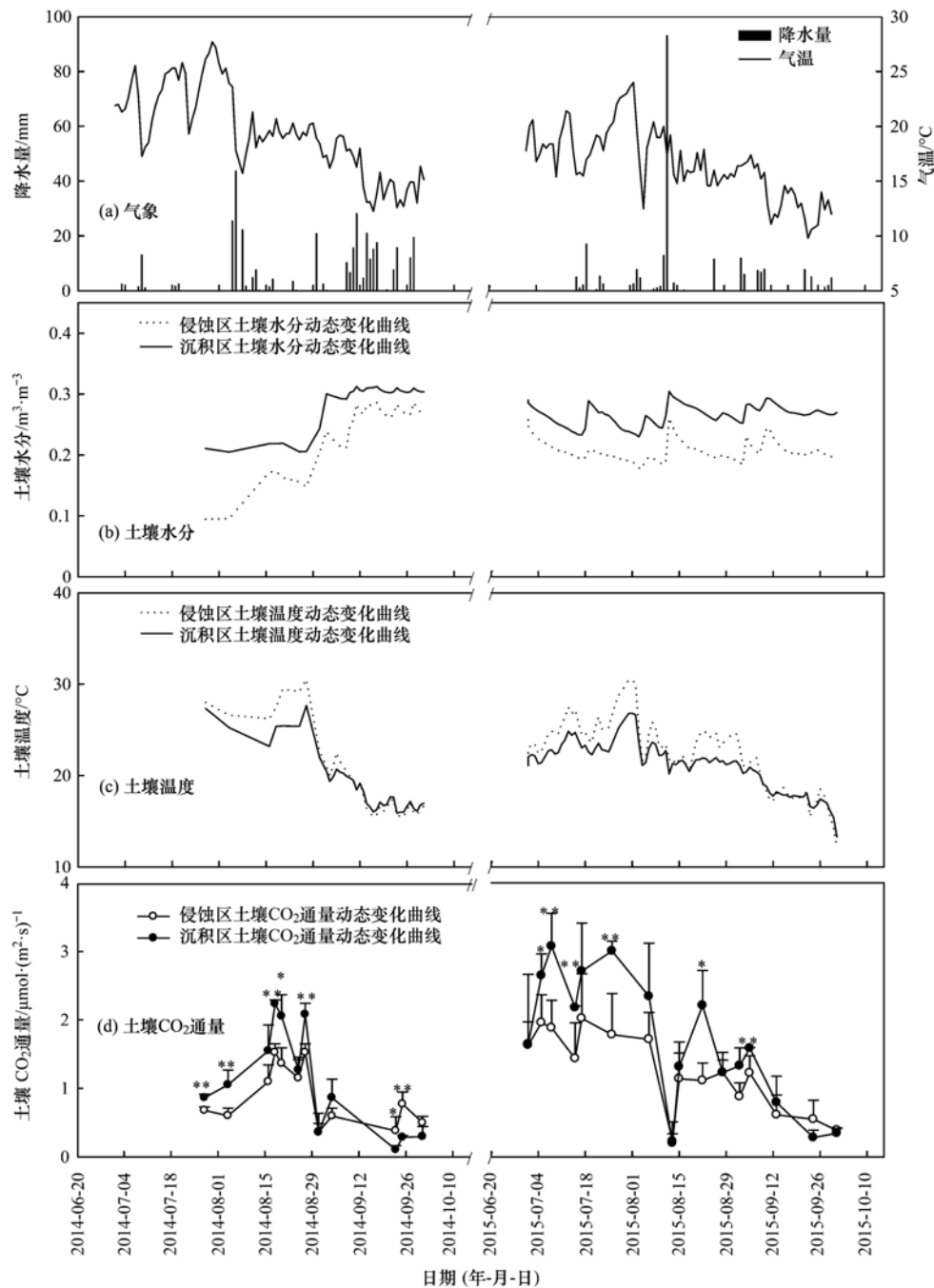
| 划区  | 指标类型                                                                            | 2014 年           | 2015 年           | 平均值              |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 侵蚀区 | 土壤 CO <sub>2</sub> 通量均值/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | $0.88 \pm 0.10$  | $1.21 \pm 0.25$  | $1.05 \pm 0.23$  |
|     | 土壤水分均值/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$                                        | $0.20 \pm 0.01$  | $0.21 \pm 0.01$  | $0.21 \pm 0.01$  |
|     | 土壤温度均值/ $^\circ\text{C}$                                                        | $24.06 \pm 1.21$ | $22.18 \pm 2.13$ | $23.12 \pm 1.33$ |
|     | 土壤 CO <sub>2</sub> 通量温度敏感性 ( $Q_{10}$ )                                         | $1.89 \pm 1.10$  | $2.78 \pm 0.78$  | $2.34 \pm 0.63$  |
| 沉积区 | 土壤 CO <sub>2</sub> 通量均值/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | $1.08 \pm 0.18$  | $1.68 \pm 0.34$  | $1.38 \pm 0.42$  |
|     | 土壤水分均值/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$                                        | $0.23 \pm 0.00$  | $0.27 \pm 0.01$  | $0.25 \pm 0.03$  |
|     | 土壤温度均值/ $^\circ\text{C}$                                                        | $22.53 \pm 0.95$ | $20.85 \pm 1.30$ | $21.69 \pm 1.19$ |
|     | 土壤 CO <sub>2</sub> 通量温度敏感性 ( $Q_{10}$ )                                         | $6.51 \pm 1.13$  | $9.76 \pm 1.05$  | $8.14 \pm 2.30$  |

2.2 侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量及土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感性( $Q_{10}$ )的变化特征

试验期间侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量动态变化特征基本一致, 整体呈下降趋势, 但沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量波动较为剧烈. 2014 年侵蚀区变化范围为  $0.36 \sim 1.53 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 沉积区变化范围为  $0.11 \sim 2.24 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ; 2015 年侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化范围分别为  $0.23 \sim 2.02 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  和  $0.21 \sim 3.08 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

[图 2(d)]. 侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量均值存在显著差异 ( $P < 0.05$ ): 沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量 [ $1.38 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ] 较侵蚀区 [ $1.05 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ] 提高 31% (表 1), 2014 年沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量较侵蚀区提高 23% [ $1.08 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1} > 0.88 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ]; 2015 年沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量较侵蚀区提高 39% [ $1.68 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1} > 1.21 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ].

依据观测期内所测定的试验数据对土壤 CO<sub>2</sub>



\* 表示  $P < 0.05$ , 侵蚀区土壤  $\text{CO}_2$  通量与沉积区存在显著差异; \*\* 表示  $P < 0.01$ ,

侵蚀区土壤  $\text{CO}_2$  通量与沉积区存在极显著差异; 2014 年试验过程中因试验设备出现故障, 故缺少 7 月 1 ~ 27 日的数据 (气象数据除外)

图 2 2014 和 2015 年休闲季土壤  $\text{CO}_2$  通量及其环境因子动态变化特征

Fig. 2 Dynamics of soil  $\text{CO}_2$  flux and its environmental factors under fallow in 2014 and 2015

通量温度敏感性进行计算, 沉积区  $Q_{10}$  显著大于侵蚀区 ( $P < 0.01$ ); 2014 年分别为 6.51 和 1.89, 2015 年分别为 9.76 和 2.78 (表 1).

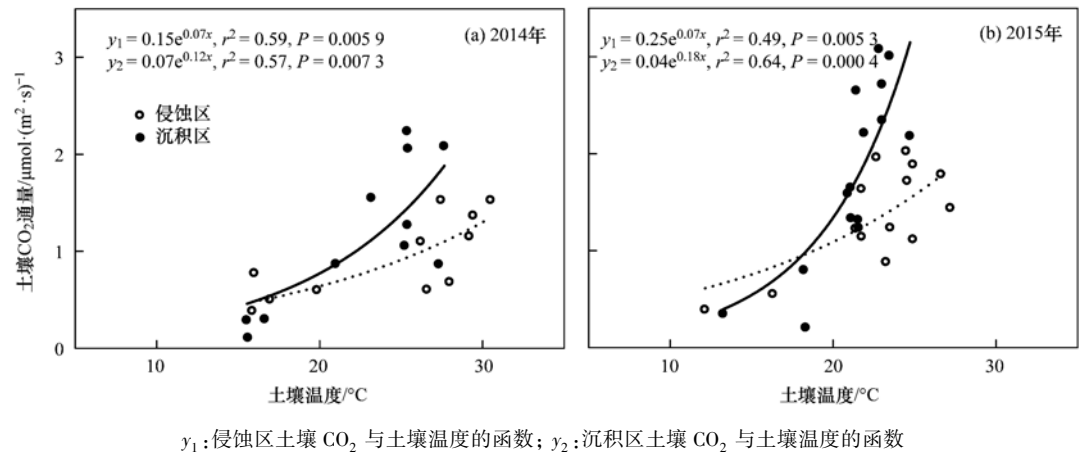
### 2.3 土壤呼吸速率与土壤温度、土壤水分的关系

2014 年土壤  $\text{CO}_2$  通量与土壤温度动态变化趋势基本一致, 7 月 28 日 ~ 8 月 27 日土壤  $\text{CO}_2$  通量及土壤温度较高, 变化幅度较大, 8 月 31 日 ~ 10 月 1

日二者均呈下降趋势, 变化幅度较小. 2015 年土壤温度整体变化幅度较土壤  $\text{CO}_2$  通量相对较小, 但二者动态变化特征相似 (总体动态变化均呈下降趋势); 7 月 1 日 ~ 9 月 5 日土壤  $\text{CO}_2$  通量及土壤温度相对较高, 变化幅度较大, 相比之下, 9 月 8 日 ~ 10 月 1 日二者均缓慢下降, 变化幅度较小 [图 2(c) 和 2(d)].

对土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度回归模拟分析发现,土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度呈显著指数相关性( $P < 0.01$ ),2014 年侵蚀区和沉积区土壤温度分别可

解释相应土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化的 59% 和 57%,2015 年分别可解释 49% 和 64% 的土壤 CO<sub>2</sub> 通量 [图 3 (a) 和 3(b)]。



$y_1$ : 侵蚀区土壤 CO<sub>2</sub> 与土壤温度的函数;  $y_2$ : 沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 与土壤温度的函数

图 3 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度的关系

Fig. 3 Relationship between soil CO<sub>2</sub> flux and soil temperature

2014 年土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分整体动态变化趋势相反,土壤 CO<sub>2</sub> 通量随土壤水分的升高呈下降趋势;7 月 28 日~8 月 27 日土壤水分较低,波动较大,相应土壤 CO<sub>2</sub> 通量较高,波动强烈;8 月 31 日~10 月 1 日土壤水分较高,而土壤 CO<sub>2</sub> 通量较低. 与 2014 年不同,2015 年土壤水分变化平缓,但土壤 CO<sub>2</sub> 通量动态变化呈下降趋势 [图 2(b) 和 2(d)].

对土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分回归模拟发现,土壤水分与土壤 CO<sub>2</sub> 通量相关性显著 (2014 年: $P = 0.0015$ ,2015 年: $P = 0.0085$ ),2014 年土壤水分可解释土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化的 50% [图 4(a)],但 2015 年土壤水分仅可解释土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化的 31%

[图 4(b)].

2.4 径流量、泥沙量及 SOC 含量变化

2014 年试验观测期间,14 次降雨使侵蚀部位产生径流泥沙,降雨量为 279.0 mm,径流系数变化范围为 0.10~0.51,平均约 29% 的降雨转化为径流,侵蚀泥沙总量为 45.86 kg. 2015 年产生径流泥沙的降雨 5 次,降雨量为 145.3 mm,径流系数为 0.20~0.51,转化为径流的降雨量达 31%,泥沙总量为 44.75 kg. 这些结果表明:试验期间,侵蚀部位约有 30% 的降水以径流形式汇集到了沉积区. 此外,泥沙中 SOC 含量为 5.61~8.35 g·kg<sup>-1</sup>,高于试验之初 SOC 含量(6.83 g·kg<sup>-1</sup>),这一结果表明:随泥沙的迁移,沉积区 SOC 含量增加(表 2).

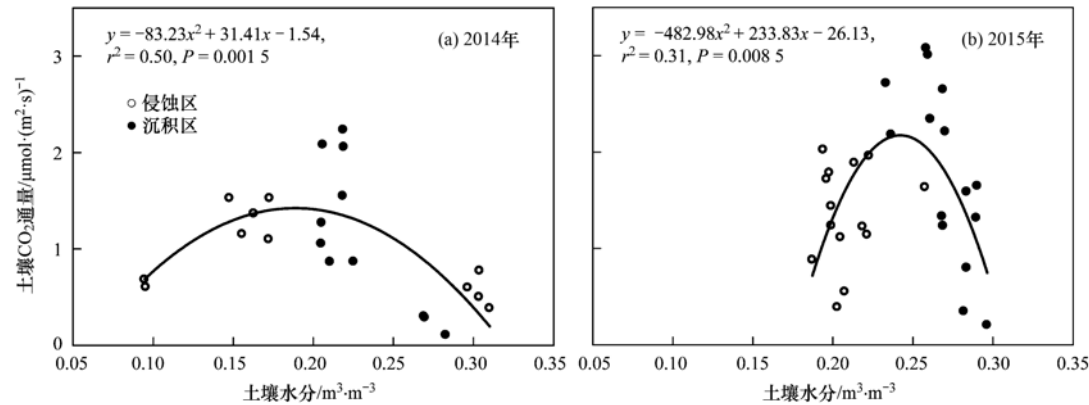


图 4 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分的关系

Fig. 4 Relationship between soil CO<sub>2</sub> flux and soil moisture

表 2 径流量、泥沙量及 SOC 含量变化<sup>1)</sup>

Table 2 Variation of runoff, sediment and SOC

| 年份   | 日期<br>(月-日) | 降雨量( <i>P</i> )<br>/mm | 径流深度( <i>h</i> )<br>/mm | 径流系数( $\alpha$ ) | 泥沙重量( <i>m</i> )<br>/kg | SOC 含量<br>/g·kg <sup>-1</sup> |
|------|-------------|------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 2014 | 07-09       | 13.0                   | 1.62                    | 0.12             | 0.62                    | —                             |
|      | 08-05       | 25.4                   | 5.56                    | 0.22             | 4.10                    | —                             |
|      | 08-06       | 43.6                   | 22.16                   | 0.51             | 12.21                   | —                             |
|      | 08-08       | 22.2                   | 10.39                   | 0.47             | 3.61                    | —                             |
|      | 08-30       | 20.8                   | 7.28                    | 0.35             | 2.92                    | —                             |
|      | 09-08       | 10.2                   | 0.98                    | 0.10             | 1.08                    | —                             |
|      | 09-10       | 15.6                   | 3.12                    | 0.20             | 1.78                    | —                             |
|      | 09-11       | 28.1                   | 8.96                    | 0.32             | 4.49                    | —                             |
|      | 09-14       | 20.9                   | 4.48                    | 0.21             | 3.74                    | —                             |
|      | 09-15       | 11.5                   | 1.89                    | 0.16             | 1.11                    | —                             |
|      | 09-16       | 15.1                   | 2.68                    | 0.18             | 2.40                    | —                             |
|      | 09-17       | 17.5                   | 3.79                    | 0.22             | 2.54                    | —                             |
|      | 09-23       | 15.7                   | 2.84                    | 0.18             | 1.73                    | —                             |
|      | 09-28       | 19.4                   | 4.74                    | 0.24             | 3.53                    | —                             |
| 2015 | 07-19       | 17.0                   | 3.32                    | 0.20             | 4.51                    | 5.61                          |
|      | 08-11       | 12.9                   | 3.62                    | 0.28             | 2.12                    | 7.01                          |
|      | 08-12       | 93.0                   | 46.99                   | 0.51             | 31.35                   | 8.06                          |
|      | 08-26       | 11.5                   | 3.77                    | 0.33             | 3.56                    | 7.25                          |
|      | 09-03       | 11.9                   | 6.12                    | 0.51             | 3.21                    | 8.35                          |

1) 因受外界影响,2014 年试验结果缺少泥沙中的 SOC 含量数据;“—”表示无相关数据

3 讨论

3.1 土壤水分对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

土壤水分是影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量的重要因素<sup>[18]</sup>. 受降雨及径流影响,土壤水分在不同地形条件下重新分布,发生空间变异,引起土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化. 2014 年和 2015 年试验期间约 29% 和 31% 的降雨转化为径流从侵蚀区汇聚到沉积区(表 2),造成沉积区土壤水分显著高于侵蚀区( $P < 0.05$ ). 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤水分存在显著二次抛物线关系,在土壤水分相对亏缺时,随土壤水分逐渐升高,土壤 CO<sub>2</sub> 通量相应增大,但当土壤水分增加到临界点时(侵蚀区:0.19 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>,沉积区:0.24 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>),则抑制土壤 CO<sub>2</sub> 通量,此后随土壤水分的增加土壤 CO<sub>2</sub> 通量下降[图 2(b) 和 2(d)],这一结果与 Wang 等<sup>[17]</sup>、张红星等<sup>[19]</sup>的报道一致.

一般而言,由于沉积区土壤水分高于侵蚀区致使沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量高于侵蚀区;但在强降雨或连续降雨等特殊条件下,侵蚀区土壤 CO<sub>2</sub> 通量大于沉积区:2014 年 8 月 31 日~10 月 1 日和 2015 年 8 月 13 日、8 月 26 日~10 月 1 日,受强降雨或连续降雨事件影响,土壤水分升高,土壤 CO<sub>2</sub> 通量下降,甚至出现沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量小于侵蚀区的现象[图 2(d)]. 此结果与高翔等<sup>[20]</sup>在巴西亚马逊河流

域东部森林和草原的土壤 CO<sub>2</sub> 通量研究类似. 土壤水分超过临界点时,土壤 CO<sub>2</sub> 通量开始减弱,土壤水分对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的抑制作用就会表现出来<sup>[19]</sup>,沉积区土壤水分受降雨和径流双重补给使土壤水分过高,水分填充土壤空隙,阻止气体扩散,使得土壤 CO<sub>2</sub> 通量减小,相比侵蚀区土壤水分仅受降雨补给,土壤水分升高幅度不大,对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的抑制作用较小,从而出现沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量小于侵蚀区的现象. 相反,金冠一等<sup>[21]</sup>研究发现:降雨后土壤水分增加,使得土壤 CO<sub>2</sub> 通量相比降雨前提高 2 倍. 上述不同结果差异的主要原因可能是:金冠一等研究的土壤在降雨前土壤水分相对亏缺,土壤水分的增加是影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量的关键因子<sup>[19]</sup>,降雨后土壤水分充足,土壤微生物呼吸提高,土壤 CO<sub>2</sub> 通量相应增加<sup>[22]</sup>;而本试验土壤水分相对较高,降雨后土壤水分过高,土壤微生物呼吸受到抑制,且水分填充土壤空隙,阻止气体扩散,从而使土壤 CO<sub>2</sub> 通量下降<sup>[21,22]</sup>.

3.2 SOC 对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

SOC 作为微生物呼吸的底物,其在侵蚀区和沉积区的显著差异会导致土壤 CO<sub>2</sub> 通量的空间变化<sup>[5,23,24]</sup>. 2014 年和 2015 年侵蚀产生的泥沙总量分别为 45.86 kg 和 44.75 kg(表 2),而 SOC 流失主要以泥沙为载体被带走(最高可以达到 95% 以

上)<sup>[5-7]</sup>, 这表明大量 SOC 随泥沙从侵蚀区汇聚到了沉积区. 2015 年试验结果表明平均每次降雨泥沙中 SOC 含量达  $7.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 即相当于次降雨过程中,  $1 \text{ kg}$  泥沙中约含  $7.26 \text{ g}$  SOC, 这与试验之初的 SOC 含量 ( $6.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 相比提高 6% (表 2). 因此, 在泥沙迁移过程中, 大量 SOC 随之从侵蚀区被搬运到沉积区, 这导致沉积区 SOC 含量增高. 侵蚀条件下泥沙在侵蚀区和沉积区发生迁移和重新分布, 使 SOC 随之流失和累积, 极大地改变 SOC 矿化的微生物进程和其它相关环境因子, 从而间接影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量的大小<sup>[25]</sup>. 李嵘等<sup>[25]</sup> 研究发现: 土壤侵蚀和沉积作用使土壤 CO<sub>2</sub> 通量在侵蚀区和沉积区发生变化, 沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量显著提高, 且其高于侵蚀区. 土壤侵蚀再分布驱动的 SOC 空间差异是导致这现象的重要原因<sup>[26]</sup>.

### 3.3 土壤温度对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

土壤温度对土壤 CO<sub>2</sub> 通量也有重要影响<sup>[27,28]</sup>, 但本试验中侵蚀区和沉积区土壤温度差异不显著, 侵蚀区土壤温度稍高于沉积区 (7%). 因此, 在本试验中土壤温度不是影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量侵蚀与沉积部分变异的主要因素, 这与许多研究结果一致<sup>[29]</sup>.

### 3.4 土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感性 ( $Q_{10}$ ) 在侵蚀区和沉积区的变化特征及其影响因素

土壤 CO<sub>2</sub> 通量温度敏感性 ( $Q_{10}$ ) 受温度、水分、底物及时空尺度等多种因素的影响, 常有极大的变率, 从不敏感 ( $Q_{10}$  接近或者小于 1) 到极度敏感 ( $Q_{10}$  值大于 20)<sup>[30-32]</sup>. 本试验中, 2014 年和 2015 年沉积区  $Q_{10}$  较侵蚀区提高 244% 和 251%,  $Q_{10}$  在侵蚀区与沉积区的空间变异较大, 出现这一试验结果的原因可能是土壤水分及 SOC 空间分布的变异性. 许多研究结果表明: 土壤水分是影响  $Q_{10}$  的重要因素. 当土壤水分条件较适宜时,  $Q_{10}$  升高<sup>[33]</sup>, 相反, 当土壤水分较低时, 则  $Q_{10}$  降低<sup>[34-36]</sup>. 此外, SOC 作为土壤 CO<sub>2</sub> 通量的底物, 对  $Q_{10}$  有重要影响. Fierer 等<sup>[37]</sup> 在室内控制温度不变的情况下采用外加有机质的方法发现, 培育期内随着基础土壤 CO<sub>2</sub> 通量速率的逐步下降, 凋落物分解的  $Q_{10}$  越来越高. 同时, Gershenson 等<sup>[38]</sup> 研究指出: 提高底物的供应能力, 土壤 CO<sub>2</sub> 通量的  $Q_{10}$  值明显增加. 本试验过程中, 受降雨及径流影响, 沉积区土壤水分较高, 且侵蚀区 SOC 随径流泥沙汇集于沉积区, 从而使得沉积区土壤水分条件适宜, SOC 含量丰富,  $Q_{10}$  增大; 然而, 侵蚀区土壤水分及 SOC 含量均较低, 故  $Q_{10}$  相对减小.

## 4 结论

土壤侵蚀-沉积导致环境因子变化对土壤 CO<sub>2</sub> 通量有重要影响. 侵蚀区和沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 沉积区土壤 CO<sub>2</sub> 通量较侵蚀区提高 31%, 土壤水分和 SOC 是影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量的重要因素.

### 参考文献:

- [1] Van Oost K, Quine T A, Govers G, *et al.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, **318**(5850): 626-629.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [3] 裴会敏, 许明祥, 脱登峰. 黄土丘陵区坡地侵蚀对土壤呼吸的影响[J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(4): 1-4, 15.
- [4] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 437-450.
- [5] Polyakov V O, Lal R. Soil organic matter and CO<sub>2</sub> emission as affected by water erosion on field runoff plots [J]. *Geoderma*, 2008, **143**(1-2): 216-222.
- [6] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究 [J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(2): 30-33.
- [7] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 耕作及水蚀影响下坡耕地土壤有机碳动态模拟[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(5): 730-735.
- [8] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, *et al.* Effect of soil temperature and soil moisture on CO<sub>2</sub> flux from eroded landscape positions on black soil in Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **144**: 119-125.
- [9] Lal R. Soil erosion and carbon dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, **81**(2): 137-142.
- [10] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO<sub>2</sub>-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(1): 286-293.
- [11] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(1): 416-426.
- [12] Liu S G, Bliss N, Sundquist E, *et al.* Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2003, **17**(2), doi: 10.1029/2002GB002010.
- [13] 王刚, 李小曼. 黄土高原土壤侵蚀与聚落生存对策研究 [J]. *水土保持通报*, 2005, **25**(1): 25-28.
- [14] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, *et al.* Microbial biomass and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses; a case study at Three Gorges Reservoir Area, South China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, **137**(3-4): 294-307.
- [15] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性 [J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(2): 59-63.
- [16] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of  $Q_{10}$  determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J].

- Global Biogeochemical Cycles, 2001, **15**(3): 687-696.
- [17] Wang R, Guo S L, Jiang J S, *et al.* Tree-scale spatial variation of soil respiration and its influence factors in apple orchard in Loess Plateau [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **102**(2): 285-297.
- [18] Chan C, Kay B D, Gregorich E G. Factors influencing mineralizable carbon in a landscape with variable topography [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2007, **87**(5): 495-509.
- [19] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应 [J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6189-6196.
- [20] 高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 等. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响 [J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 7883-7893.
- [21] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应 [J]. 生态学报, 2013, **33**(6): 1832-1841.
- [22] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. Oecologia, 2004, **141**(2): 221-235.
- [23] Karhu K, Auffret M D, Dungait J A J, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response [J]. Nature, 2014, **513**(7516): 81-84.
- [24] 车升国, 郭胜利, 张芳, 等. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素 [J]. 土壤学报, 2010, **47**(6): 1159-1169.
- [25] 李嵘, 李勇, 李俊杰, 等. 黄土丘陵侵蚀坡地土壤呼吸初步研究 [J]. 中国农业气象, 2008, **29**(2): 123-126.
- [26] 耿肖臣, 李勇, 于寒青, 等. 坡耕地侵蚀区和堆积区初春土壤呼吸的变化 [J]. 核农学报, 2012, **26**(3): 543-551, 593.
- [27] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3174-3180.
- [28] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 [J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1026-1033.
- [29] Borken W, Davidson E A, Savage K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(6): 1888-1896.
- [30] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, *et al.* Dependence of the  $Q_{10}$  values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, **292**(1-2): 171-179.
- [31] 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 [J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3383-3392.
- [32] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in  $Q_{10}$  of soil respiration in a beech forest [J]. Global Change Biology, 2003, **9**(6): 911-918.
- [33] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(3): 820-828.
- [34] Nikolova P S, Raspe S, Andersen C P, *et al.* Effects of the extreme drought in 2003 on soil respiration in a mixed forest [J]. European Journal of Forest Research, 2009, **128**(2): 87-98.
- [35] Jassal R S, Black T A, Novak M D, *et al.* Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(6): 1305-1318.
- [36] Almagro M, López J, Querejeta J I, *et al.* Temperature dependence of soil  $\text{CO}_2$  efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(3): 594-605.
- [37] Fierer N, Craine J M, McLauchlan K, *et al.* Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition [J]. Ecology, 2005, **86**(2): 320-326.
- [38] Gershenson A, Bader N E, Cheng W X. Effects of substrate availability on the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition [J]. Global Change Biology, 2009, **15**(1): 176-183.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....                                                                                   | FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)            |
| Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....                                                   | WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)           |
| Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....                          | LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)         |
| Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....                                                            | WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)                 |
| Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                  | XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)               |
| Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....                                                                                  | LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)                 |
| Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....                                    | WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)             |
| Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....                                           | WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)                    |
| Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....                                                   | LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)                                     |
| Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....                                                                 | JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)                                   |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....                     | GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)              |
| Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....                                       | CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)           |
| Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....                                                 | ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)   |
| Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....                                             | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)         |
| Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....    | ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)       |
| Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....                                  | LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)        |
| Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....                                                                              | LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)             |
| Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC ..... | HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)   |
| Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....                                                                          | ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)            |
| Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....                                            | AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)            |
| Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....                        | WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)        |
| Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....                                     | LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)          |
| Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....                                                  | XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)                |
| Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....                       | WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)                             |
| Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....                                                                  | ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)               |
| Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....                                                               | YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)            |
| Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....                                | WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)          |
| Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....                                                                     | LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)                  |
| Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....                                                                               | JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)          |
| Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....                                                     | SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)         |
| Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite .....                                                                               | CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498) |
| Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....                                                                          | MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)           |
| Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....                                             | LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)       |
| Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....                                                                        | HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)                      |
| Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....                                           | WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)                           |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China ..... | DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)              |
| Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....                                                                    | JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)       |
| Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....                                                                                               | GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)          |
| Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....                                       | YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)             |
| Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....                                                    | ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)                |
| Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....                                                     | ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)              |
| Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....     | ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)                                   |
| Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....                                                    | SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)                |
| Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....                    | HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)           |
| Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....                                    | DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)              |
| Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinxi Region of Taiyuan City .....                                        | YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)           |
| Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....                                                                | WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)      |
| Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....                                     | XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)              |
| Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....                                                                       | LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)                           |
| Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....                                                                 | LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)               |
| Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....                                                                          | LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)                         |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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   | 中国国际图书贸易集团有限公司<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行