

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F_{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究

张赛, 王龙昌*, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕

(西南大学农学与生物科技学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400716)

摘要: 为了研究小麦农田生态系统土壤碳排放与作物碳蓄积特征, 采用 LI6400-09 在重庆北碚西南大学教学试验农场对平作(T)、垄作(R)、平作+覆盖(TS)、垄作+覆盖(RS)这4种处理下的西南紫色土丘陵区小麦/玉米/大豆套作体系中小麦生长季节的土壤呼吸及植株生长动态进行了观测。利用根系生物量外推法(root biomass regression, RBR)和根排除法(root exclusion, RE)这两种方法比较分析根系呼吸对土壤总呼吸的贡献, 并估算小麦农田碳收支状况。结果表明, 土壤呼吸介于 $0.62 \sim 2.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $1.71 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。T、R、TS、RS各处理日均土壤呼吸速率分别为 1.29、1.59、1.99、 $1.96 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 表现为 $T < R < RS < TS$ 。小麦拔节期以前垄作对土壤呼吸的影响不显著, 拔节期开始垄作处理提高了土壤呼吸速率。秸秆覆盖对土壤呼吸的影响最大, 始终保持较高的土壤呼吸速率。在小麦生长的 169 d 里, T、R、TS、RS 这4个处理的土壤呼吸总量为 2 266.82、2 799.52、3 483.73、3 443.89 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 地上部分生物量累计为 51 800.84、59 563.20、66 015.37、71 331.63 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与对照相比, R、TS、RS 这3个处理分别增产 14.99%、27.44% 和 37.70%。RBR 方法测得根系呼吸贡献为 47.05%, 根系呼吸速率在 $0.201 \sim 1.226 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间, RE 法下则为 53.97%。在小麦生长初期农田表现为弱的碳源, 拔节期开始随着小麦植株的生长, 农田碳汇能力越来越强, 在灌浆期达到最大, 随后进入成熟期, 农田又呈现出碳源特征。小麦生长季 T、R、TS、RS 各处理总的碳收支分别为 5 924.512、6 743.807、8 350.741、8 876.115 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 因此, 以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作能显著提高农田生态系统的碳汇能力, 增汇幅度达 13.83% ~ 49.82%。

关键词: 根系生物量外推法; 根排除法; 土壤呼吸; 作物生物量; 保护性耕作; 小麦

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2419-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.06.051

Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage

ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, JIA Hui-juan, RAN Chun-yan

(Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to study the characteristics of carbon sources and sinks in the winter wheat farmland ecosystem in southwest hilly region of China, the LI6400-09 respiratory chamber was adopted in the experiment conducted in the experimental field in Southwest University in Chongqing. The soil respiration and plant growth dynamics were analyzed during the growth period of wheat in the triple intercropping system of wheat-maize-soybean. Four treatments including T (traditional tillage), R (ridge tillage), TS (traditional tillage + straw mulching), and RS (ridge tillage + straw mulching) were designed. Root biomass regression (RR) and root exclusion (RE) were used to compare the contribution of root respiration to total soil respiration. The results showed that the average soil respiration rate was $1.71 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ with a variation of $0.62 \sim 2.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. Significant differences in soil respiration rate were detected among different treatments. The average soil respiration rate of T, R, TS and RS were 1.29, 1.59, 1.99 and $1.96 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. R treatment did not increase the soil respiration rate significantly until the jointing stage. Straw mulching treatment significantly increased soil respiration, with a steadily high rate during the whole growth period. During the 169 days of growth, the total soil respiration was 2 266.82, 2 799.52, 3 483.73 and 3 443.89 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ while the cumulative aboveground biomasses were 51 800.84, 59 563.20, 66 015.37 and 71 331.63 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with the control, the yield of R, TS and RS increased by 14.99%, 27.44% and 37.70%, respectively. The contribution of root respiration to total soil respiration was 47.05% by RBR, while it was 53.97% by RE. In the early growth period, the carbon source was weak. The capacity of carbon sink started to increase at the jointing stage and reached the maximum during the filling stage. The carbon budget of wheat field was 5 924.512, 6 743.807, 8 350.741, 8 876.115 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The results indicated that ridge tillage and straw mulching conservation tillage significantly improved the carbon sink in the wheat farmland ecosystem.

Key words: root biomass regression (RR); root exclusion (RE); soil respiration (Rs); biomass; conservation tillage; wheat

在全球变化日益严峻的形势下, 对农业生态系统固碳减排的研究越来越多, 农业土壤被认为在降低大气 CO_2 浓度和减缓温室效应方面具有很大潜力^[1,2]。研究不同区域主要农田管理模式下土壤呼吸动态变化, 对减缓土壤碳排放具有重要意义^[3],

同时为国家制定更加详细的碳排放清单, 明确碳税

收稿日期: 2013-09-30; 修订日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271673, 30871474); 重庆市科技攻关项目(CSTC, 2008AB1001)

作者简介: 张赛(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态农业与可持续发展, E-mail: 532875132@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: wanglc2003@163.com

义务提供科学依据. 李银坤等^[4]指出夏玉米农田是吸收大气 CO₂ 的汇; 张前兵等^[3]研究了干旱区棉田不同施肥措施下的碳平衡状态, 仅在棉花苗期表现为碳源, 其余时期均为碳汇, 复合肥与有机肥对农田碳汇作用最大; 黄斌等^[5]的研究结果表明, 在通常情况下农田 CO₂ 释放土壤-植物系统表现为大气 CO₂ 的“汇”, 不同耕作措施只是改变了“汇”的程度; Li 等^[6]对黄土高原农田生态系统碳平衡的研究表明, 谷子农田系统的净碳输入为 1 408 kg·hm⁻². 在估算碳平衡时必须对土壤自养呼吸作用和土壤异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例进行量化^[7]. 对土壤呼吸不同组分进行量化的方法主要包括成分综合法、根系生物量外推法、根排除法、同位素标记法等^[8], 由于研究的生态系统类型差异、量化方法不同, 所得到的研究结果各不相同. Jia 等^[9]研究结果表明森林生态系统根系呼吸占土壤总呼吸的 33% ~ 89%, 草地为 17% ~ 40%, 农田为 12% ~ 38%, 北极冻土区为 50% ~ 93%. 对全球范围内的陆地生态系统研究表明, 根系呼吸占土壤总呼吸的比例在 10% ~ 90%^[10]. 过去的研究主要集中在森林和草原, 对农田的研究较少^[11], 而且对作物不同生育期阶段分别估算碳平衡的较少. 基于此开展本研究, 以期为农田生态系统碳平衡评价提供参考, 对研究土壤碳固定及寻找减缓土壤有机碳分解的对策和措施具有重要的指导意义.

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于重庆市北碚区西南大学教学试验农场, 29°51'N, 106°27'E, 海拔 244 m. 属亚热带季风湿润气候, 年均太阳总辐射量 87 108 kJ·cm⁻², 年均总日照时数 1 276.7 h, 多年平均气温 18℃, ≥10℃ 积温 5 979.5℃, 夏季最高气温达 40℃ 左右, 无霜期达 359 d. 试验地土壤为旱地紫色土, 坡度较缓, 地力相对均匀. 土壤容重 1.21 g·cm⁻³, pH 值为 6.47, 土壤有机质 28.00 g·kg⁻¹, 全氮 1.68 g·kg⁻¹, 全磷 1.46 g·kg⁻¹, 全钾 34.54 g·kg⁻¹, 速效磷 18.13 mg·kg⁻¹, 速效钾 270.23 mg·kg⁻¹, 碱解氮 35.23 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

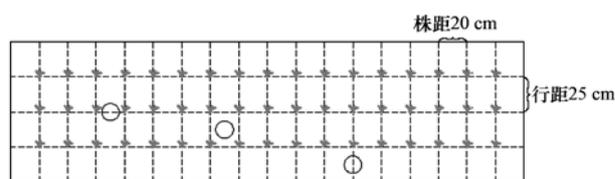
试验于 2012-11-09 ~ 2013-04-27 在西南大学教学试验农场进行, 采用“小麦/玉米/大豆”三熟复种轮作模式. 试验地已连续 7 a 开展早三熟种植模式下的保护性耕作研究, 每年的耕作处理保持一致. 共设 4 个处理, 3 次重复: 平作(T/CK), 整个试验期

采用平作; 垄作(R), 垄高约 20 cm; 平作 + 秸秆覆盖(TS), 整个试验期采用秸秆覆盖, 收获的秸秆全量就地覆盖; 垄作 + 秸秆覆盖(RS), 整个试验期起垄后覆盖秸秆, 垄高约 20 cm. 试验采用随机区组排列, 每个小区的面积为 8.0 × 3.6 m², 均分 4 厢, 每厢宽度为 1.0 m, 长度为 3.6 m. 供试作物为小麦(糯麦一号, 播种量 90 kg·hm⁻²), 每厢 3 行, 每行 17 窝. 各处理均施过磷酸钙 390 kg·hm⁻²、尿素 152 kg·hm⁻², 作为基肥在播种的同时施入. 覆盖处理所用秸秆, 于前茬小麦、玉米收获后均匀覆盖于小区内, 每小区覆盖秸秆 42.7 kg (折合 24 000 kg·hm⁻²).

1.3 取样与方 法

1.3.1 土壤呼吸 R_s (soil respiration) 测定

土壤呼吸采用 LI6400-09 测定, 从小麦苗期到收获期每半个月测定一次. 为了减少测定误差, 在测定区域按照行间、株间和条带边缘这 3 个不同位置选取 3 个固定点(见图 1), 间距约为 1 m, 每个点放自制的 PVC 环(内径 11 cm, 高 5 cm), 于测定前一天安置好, 以减少对土壤的干扰. 每个 PVC 环测定 1 次, 3 个循环, 每个处理 3 次重复, 共 9 个数据, 取其平均值作为日土壤呼吸值. 整个生育期内每半个月测定一次, 如遇下雨天气则适当调整, 测定时间统一为上午 09:00 ~ 11:00, 以往的研究证明该时间段能代表全天的土壤呼吸^[7,12].



图内小圆圈代表一个厢内布置的 PVC 环, 从左到右依次为株间、行间和条带边缘

图 1 土环安放位置

Fig. 1 Installed position of soil collars in measurement plots

1.3.2 净初级生产力 NPP 测定

小麦整个生育期每隔 15 d 左右取长势均匀的地上部分植株 5 窝, 105℃ 杀青, 80℃ 烘干称重. 地下部分生物量根据小麦根冠比估算. 样地中小麦植株的密度为 14.2 窝·m⁻², 单窝重量乘以密度即为小麦生物量. 采用收获法估算小麦净初级生产力 NPP (net primary productivity)^[13], 即两次采样的重量差, 公式为:

$$NPP = (B_2 - B_1) / (t_2 - t_1)$$

式中, B_1 、 B_2 分别是 t_1 、 t_2 时刻的生物量

($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.3.3 根系呼吸(R_d)估算方法

为了精确估算土壤呼吸中根系呼吸的贡献,采用根系生物量外推法和根排除法两种方法进行对比分析. 其中根系生物量外推法计算原理:在选择样点时,根据小麦种植位置,由近到远选择样点,并穿插考虑行间、株间和条带边缘的不同位置,选择一系列根系生物量差异尽可能大的不同样点,对土壤呼吸总量和相应呼吸面积下根系生物量进行测定,获得两者之间的相关关系,外推到根系生物量为零时的土壤呼吸速率即是土壤净呼吸速率,根系呼吸为土壤净呼吸基础上的净增加值. 其中根系取样方法具体为:用与 PVC 环直径等同的土钻取出环中的土壤圆柱(直径为 10 cm,深度为 20 cm),每个处理 6 个,共 24 个. 然后用去离子水冲洗挑选出小麦根系,80℃ 下烘干至恒重后称重.

根排除法计算原理:带根土壤的二氧化碳通量 - 无根土壤的二氧化碳通量 = 根呼吸^[7]. 具体操作:在每个小区的 4 厢选择一厢不种小麦作为无根土壤的代表,分别测定无根土壤和种植小麦带的土壤呼吸,两者的差值即为根呼吸.

1.3.4 农田生态系统碳平衡计算

采用净生态系统生产力 NEP (net ecosystem productivity) 来表示生态系统碳平衡^[14], 计算公式为:

$$\text{NEP} = \text{NPP} - R_m = \text{NPP} - (R_s - R_d)$$

式中,NPP 为小麦地上部分和地下部分生物量总和

[$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$],经测定本试验使用的小麦植株碳含量平均为 40.92%. R_m 为土壤异养呼吸 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], R_s 为土壤总呼吸 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], R_d 为土壤自养呼吸 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], $1 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1} = 1.0368 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1} = 10.368 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 依据土壤呼吸速率和小麦生育期天数,换算成各个生育期的土壤碳排放量 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$].

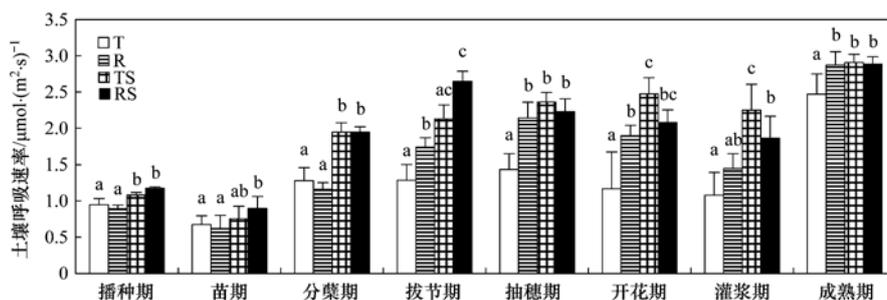
1.4 数据处理

所有数据处理在 SPSS 13.0 和 Excel 2003 表格中完成.

2 结果与分析

2.1 小麦农田土壤呼吸特征

图 2 指出,小麦田土壤呼吸在 $0.62 \sim 2.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间波动,平均值为 $1.71 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 小麦拔节期以前垄作对土壤呼吸的影响不显著,拔节期开始垄作处理提高了土壤呼吸速率. 秸秆覆盖对土壤呼吸的影响最大,一直保持较高的土壤呼吸速率. T、R、TS、RS 各处理日均土壤呼吸速率分别为 1.29、1.59、1.99、1.96 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,表现为 $T < R < RS < TS$. 进一步的方差分析表明,TS、RS 的日均土壤呼吸显著高于对照 ($P < 0.05$),而 R 处理下的土壤呼吸速率与对照没有显著差异. 在小麦生长的 169 d 里,4 个处理的土壤呼吸总量为 2 266.82、2 799.52、3 483.73、3 443.89 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.



图中不同小写字母表示各处理下的土壤呼吸速率差异在 0.05 水平显著,下同

图 2 小麦生育期不同处理土壤呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration rate at the wheat growing stages

2.2 小麦地上部分生物量积累动态

从图 3 可以看出,垄作和秸秆覆盖处理能够促进小麦地上部分生物量的增加,不同处理地上部分生物量累计为 51 800.84、59 563.20、66 015.37、71 331.63 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 与对照相比,R、TS、RS 这 3 个处理增加了 14.99%、27.44% 和 37.70%.

2.3 小麦根系呼吸对土壤总呼吸的贡献

2.3.1 根系生物量外推法

对根系生物量和土壤呼吸速率进行曲线估计,发现小麦根系生物量与土壤呼吸之间存在一定的线性关系(见图 4). 在小麦生长季内,根系生物量分别解释不同生长阶段土壤呼吸速率差异的 24.2%

(分蘖期)、50.7% (拔节期)、65.8% (抽穗期) 和 33.7% (灌浆期).

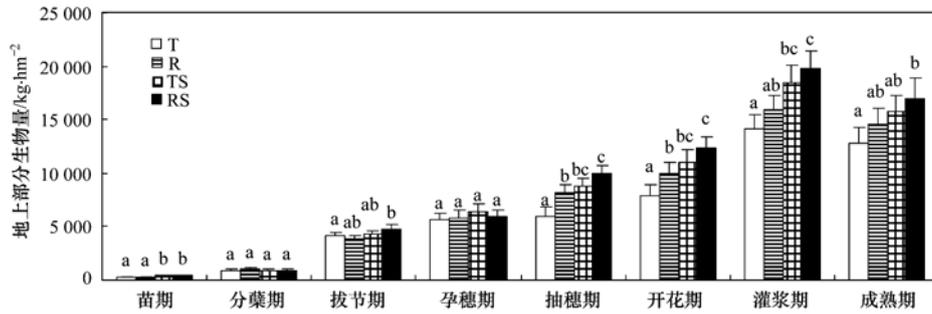
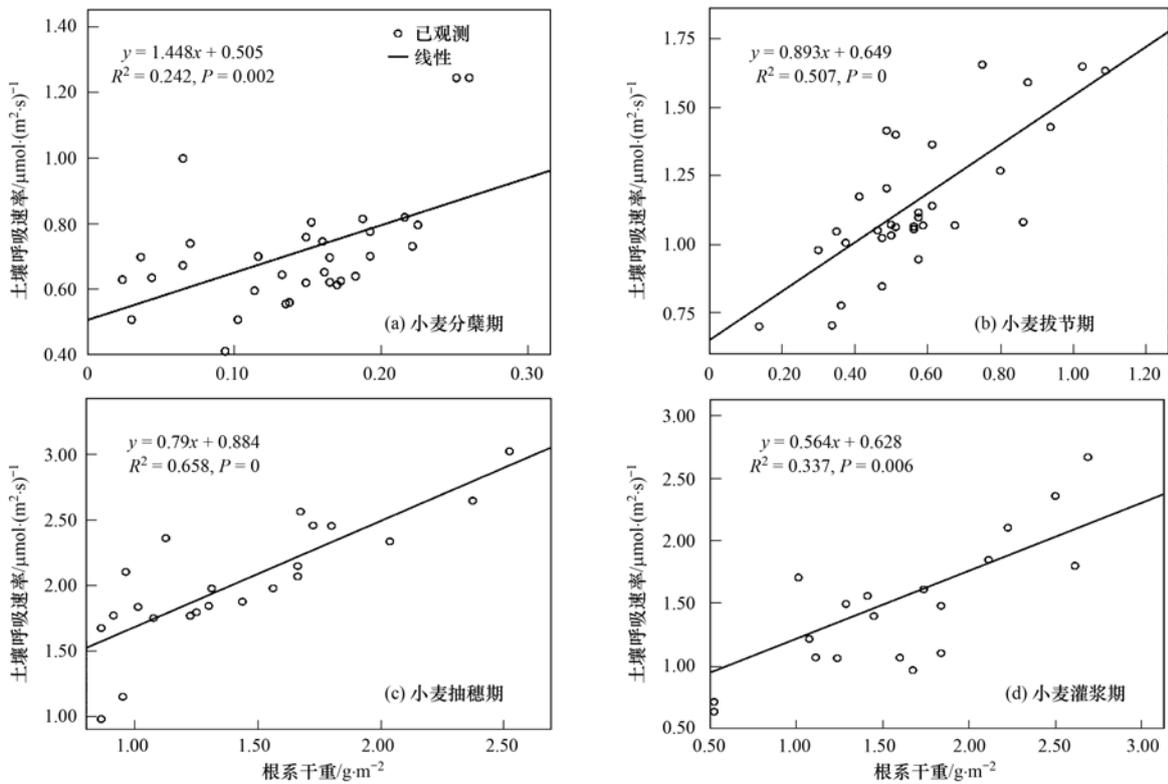


图 3 小麦地上部分生物量动态变化

Fig. 3 Dynamics of aboveground biomass of wheat



x 表示根系生物量, y 表示土壤呼吸, R^2 为拟合方程的决定系数, P 值为显著性水平

图 4 小麦不同生育期根系生物量与土壤呼吸的回归分析

Fig. 4 Regression analysis of root biomass and soil respiration at different stages of wheat development

根据生物量外推法测定根系呼吸的原理, 计算土壤总呼吸中根系呼吸和微生物呼吸的贡献 (见表 1). 小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期这 4 个时段的根系呼吸分别为 0.20、0.49、1.23、0.83 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 在小麦生长季中, 根系呼吸速率 (R_d) 在 0.201 ~ 1.226 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间, 波动较大, 而土壤微生物呼吸作用 R_m 的波动较小, 在 0.505 ~ 0.874 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间. 土壤呼吸作用中根系呼吸所占比例的季节变化呈单峰型, 在抽穗期达到最高值. 4 个时段根系呼吸占土

壤呼吸的比例分别为 28.5%、43.2%、61% 和 55.1%, 随着小麦根系生物量的增加, 根系呼吸占土壤呼吸的比例也随之增加, 平均值为 47.05%, 在小麦生长后期, 土壤呼吸开始下降, 根系呼吸占土壤呼吸的比例也略有降低, 可能与死根数量的增加有关.

2.3.2 根排除法

在小麦整个生育期内, 根据根排除法计算得到根系呼吸占土壤呼吸的比例平均为 53.97%, 较根系生物量外推法略高. 小麦不同生育期根系呼吸所

占比例不同(见表2),呈现双峰型变化规律,在小麦拔节期和开花期达到两个高峰,根系呼吸速率(R_d)在 $0.378 \sim 1.57 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间波动,高于根

系生物量外推法得到的结果. 原因可能是由于根系生物量外推法下根系取样误差较大,存在根系断裂导致取不完整的情况.

表1 小麦生长季中根系呼吸占土壤呼吸的比例——根系生物量外推法

| 生育期 | 土壤呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 微生物呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 根系呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 根系呼吸作用比例 /% |
|-----|---|--|---|----------------|
| 分蘖期 | 0.706 | 0.505 | 0.201 | 28.47 |
| 拔节期 | 1.143 | 0.649 | 0.494 | 43.22 |
| 抽穗期 | 2.010 | 0.874 | 1.226 | 61.00 |
| 灌浆期 | 1.499 | 0.673 | 0.826 | 55.10 |

表2 小麦生长季中根系呼吸占土壤呼吸的比例——根排除法

| 生育期 | 土壤呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 微生物呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 根系呼吸速率 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 根系呼吸作用比例 /% |
|-----|---|--|---|----------------|
| 分蘖期 | 1.832 | 1.453 | 0.378 | 20.65 |
| 拔节期 | 2.288 | 0.712 | 1.576 | 68.88 |
| 孕穗期 | 2.010 | 0.990 | 1.151 | 53.76 |
| 抽穗期 | 1.896 | 0.814 | 1.082 | 57.06 |
| 开花期 | 1.499 | 0.406 | 1.044 | 71.99 |
| 灌浆期 | 2.872 | 1.394 | 1.479 | 51.48 |

2.4 小麦农田碳收支估算

小麦根冠比采用 DNDC 模型实地模拟数据,各个时期的根冠比分别为: 0.2048、0.2048、0.2164、0.3530、0.4048、0.4048、0.4048. 本研究2种方法得出的根系呼吸贡献分别是根系生物量外推法下为47.05%,根排除法下为53.97%. 第一种方法误差较大是由于根系取样存在断根导致根系不完整,尤其在西南丘陵地区土壤粘性较重时更为普遍,因此本研究在估算农田生态系统碳收支时采用根排除法计算的结果. 据此,得出小麦农田生态系统碳收支动态表(见表3). 在小麦生长初期农田表现为弱的碳源,拔节期开始随着小麦植株的生长,农田碳汇能力越来越强,在灌浆期达到最大,随后进入成熟期,农田又呈现出碳源特征. 小麦生长季 T、R、TS、RS 这4个处理总的碳收支分别为5924.512、6743.807、8350.741、8876.115 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作能显著提高农田生态系统的碳汇能力,增汇幅度高达13.83%~49.82%.

3 讨论

3.1 保护性耕作对土壤呼吸的影响

前人已经对保护性耕作下土壤呼吸速率进行了大量研究,由于地区气候、土壤、种植模式的不同,得到的结论并不统一. 一般认为秸秆还田会促进土

壤中二氧化碳的释放^[15]. 秸秆覆盖处理在不同作物中对土壤呼吸的影响趋势一致,均不同程度地增强了土壤呼吸,且随着秸秆分解后期对土壤呼吸的影响逐渐减弱^[16]. 官情等^[17]在黄土旱塬区观测冬小麦农田土壤呼吸在秸秆覆盖措施下显著高于对照. 王同朝^[18]等研究了雨养条件下冬小麦-夏玉米农田土壤呼吸,指出土壤呼吸在不同作物垄作与传统耕作对土壤呼吸的影响效果相反,而且在同种作物不同生育期也不同,其中在小麦生育期内灌浆期以前垄作高于传统耕作,成熟期相反,在玉米生育期内垄作均高于传统耕作. 张赛等^[19,20]研究表明小麦/玉米/大豆三熟套作模式下小麦田、大豆田垄作和秸秆覆盖均提高了土壤呼吸作用,而玉米农田垄作降低了土壤呼吸的作用,秸秆覆盖提高土壤呼吸作用. 因此,毋庸置疑秸秆覆盖促进土壤呼吸,而垄作会促进或者抑制土壤呼吸,因作物、土壤类型和农作制度不同而异.

3.2 根系呼吸对土壤呼吸的贡献

以往的研究结果表明根系呼吸在土壤呼吸中所占的比重从10%~90%不等,用成分综合法测定的森林土壤和非林地土壤的根系呼吸比例分别为45.8%、60.4%^[11]. 而盆栽试验得出的结果值通常在90%以上,如杨兰芳和蔡祖聪在玉米与大豆的盆栽试验中利用成分综合法得出根系呼吸占土壤呼吸的比例分别为94.8%和92%^[21]. 从未受破坏的土

表 3 小麦不同生育期农田生态系统碳收支/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$ Table 3 Farmland ecosystem carbon budget at different wheat growth stages/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$

| 生育期 | 处理 | 作物固碳 | | | 土壤排碳 | | | 碳通量 |
|-----|----|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | | 地上部分 | 地下部分 | 合计 | 根系呼吸 | 根呼吸贡献/% | 微生物呼吸 | |
| 苗期 | T | 3.515 | 0.720 | 4.235 | 1.739 | 20.65 | 6.681 | -2.446 |
| | R | 3.515 | 0.720 | 4.235 | 1.625 | 20.65 | 6.243 | -2.008 |
| | TS | 5.273 | 1.080 | 6.352 | 1.968 | 20.65 | 7.564 | -1.212 |
| | RS | 5.273 | 1.080 | 6.352 | 2.220 | 20.65 | 8.532 | -2.180 |
| 分蘖期 | T | 6.373 | 1.305 | 7.678 | 2.096 | 20.65 | 8.053 | -0.375 |
| | R | 6.420 | 1.315 | 7.735 | 1.911 | 20.65 | 7.344 | 0.391 |
| | TS | 8.377 | 1.716 | 10.093 | 2.888 | 20.65 | 11.096 | -1.003 |
| | RS | 6.721 | 1.377 | 8.098 | 3.046 | 20.65 | 11.705 | -3.607 |
| 拔节期 | T | 38.619 | 8.357 | 46.976 | 9.183 | 68.88 | 4.149 | 44.478 |
| | R | 35.808 | 7.749 | 43.557 | 10.358 | 68.88 | 4.680 | 38.572 |
| | TS | 39.745 | 8.601 | 48.345 | 14.532 | 68.88 | 6.566 | 43.550 |
| | RS | 48.019 | 10.391 | 58.411 | 16.411 | 68.88 | 7.414 | 49.346 |
| 抽穗期 | T | 33.097 | 11.683 | 44.781 | 8.057 | 57.06 | 6.063 | 38.717 |
| | R | 75.008 | 26.478 | 101.486 | 11.475 | 57.06 | 8.636 | 92.850 |
| | TS | 80.165 | 28.298 | 108.463 | 13.283 | 57.06 | 9.996 | 98.467 |
| | RS | 90.554 | 31.966 | 122.520 | 14.432 | 57.06 | 10.861 | 111.659 |
| 开花期 | T | 41.210 | 16.682 | 57.892 | 9.723 | 71.99 | 3.783 | 54.108 |
| | R | 38.157 | 15.446 | 53.603 | 15.073 | 71.99 | 5.865 | 47.739 |
| | TS | 48.841 | 19.771 | 68.612 | 18.057 | 71.99 | 7.026 | 61.587 |
| | RS | 51.894 | 21.007 | 72.900 | 16.073 | 71.99 | 6.254 | 66.647 |
| 灌浆期 | T | 170.130 | 68.869 | 238.999 | 6.004 | 51.48 | 5.658 | 233.341 |
| | R | 162.397 | 65.738 | 228.136 | 8.935 | 51.48 | 8.421 | 219.714 |
| | TS | 201.063 | 81.390 | 282.454 | 12.613 | 51.48 | 11.888 | 270.566 |
| | RS | 204.930 | 82.956 | 287.885 | 10.511 | 51.48 | 9.907 | 277.979 |
| 成熟期 | T | -52.726 | -21.344 | -74.070 | 9.469 | 51.48 | 8.925 | -82.995 |
| | R | -47.454 | -19.209 | -66.663 | 11.541 | 51.48 | 10.877 | -77.540 |
| | TS | -26.307 | -10.649 | -36.957 | 13.767 | 51.48 | 12.975 | -49.932 |
| | RS | -31.053 | -12.570 | -43.623 | 12.668 | 51.48 | 11.939 | -55.562 |

芯研究中得出,处于演替中的草原土壤总呼吸的贡献根系占 8%~17%,凋落物占 6%~16%,土壤微生物占 67%~80%;森林生态系统中根系呼吸占 35%,凋落物占 48%,土壤占 17%^[7]. 对农田生态系统的相关研究较少,有学者采用挖沟法测定黄土高原一年生禾本科草地根系呼吸在作物不同生育期占 22.3%~86.6%,平均 67.3%^[22]. 韩广轩等^[23]测得玉米根系呼吸对土壤呼吸的贡献为 54.5%,在 43.1%~63.6%之间波动. 本研究 2 种方法得出的结论分别是根系生物量外推法下根系呼吸对土壤呼吸的贡献为 47.05%,根排除法为 53.97%. 与已经公布的非森林生态系统的研究结果 60.4%较为接近^[11],但是比 Kou 等^[24]测得冬小麦田土壤根系呼吸占土壤总呼吸的 25%~29.7%的结果高,比李虎等^[25]采用 DNDC 模型模拟的结果 80%低,可能是因为采用的分离技术以及土壤性质、小麦品种、种植模式等不同引起的.

Kuzyakov^[26]指出目前最可靠的分离方法是采用同位素法中的¹⁴C 或¹³C 的持续标记法,但是只适用于实验室条件. 因此为了更加精确地估算碳通量,采用同位素标记法进行室内模拟以及模型的引入将是未来估算生态系统碳平衡更加科学的方法.

3.3 小麦农田碳平衡分析

Hollinger 等^[27]估算的玉米农田生态系统在 3 年观测中均为碳汇,净碳输入为 7 024~8 804 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 张前兵等^[3]指出在棉花生长初期,棉田表现为碳弱源,之后直到棉花收获一直表现为碳汇,这种现象也出现在玉米田^[28]. 本研究得出小麦生长初期农田表现为弱的碳源,拔节期开始随着小麦植株的生长,农田碳汇能力越来越强,在灌浆期达到最大,随后进入成熟期农田又呈现出碳源特征. 因此,不同作物在不同生育期农田生态系统表现的碳源汇能力不同. 如何在农作物生产过程中较大程度的固碳减排,合理安排农作制度并采取有效的耕作管理

措施是至关重要的。

4 结论

在西南丘陵区麦玉豆三熟种植模式下小麦农田生态系统在小麦生长季,根系呼吸对土壤总呼吸的贡献为 47.05% ~ 53.97%,在小麦不同生育期根系呼吸所占比例不同。小麦田碳源汇特征规律为除了小麦生长初期和成熟期表现为弱碳源特征外其余时间均为碳汇,且整体表现为碳汇。T、R、TS 和 RS 这 4 个处理总的碳收支分别为 5 924.512、6 743.807、8 350.741 和 8 876.115 kg·hm⁻²,以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作能显著提高农田生态系统的碳汇能力,增汇幅度高达 13.83% ~ 49.82%。

参考文献:

- [1] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, **18**(6): 980-987.
- [2] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(3): 734-743.
- [3] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(12): 2420-2430.
- [4] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(1): 18-24.
- [5] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 156-160.
- [6] Li X D, Fu H, Guo D, *et al.* Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv, Cropland on the Loess Plateau, Northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(2): 337-346.
- [7] 骆亦其, 周旭辉, 姜丽芬. 北京: 土壤呼吸与环境[M]. 高等教育出版社, 2007.
- [8] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. 地球科学进展, 2003, **18**(4): 597-602.
- [9] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(4): 653-660.
- [10] Lee M S, Kaneyuki N, Takayuki N, *et al.* Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest[J]. *Plant and Soil*, 2003, **255**(1): 311-318.
- [11] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [12] 张雪松, 申双和, 谢轶嵩, 等. 华北平原冬麦田根呼吸对土壤总呼吸的贡献[J]. 中国农业气象, 2009, **30**(3): 289-296.
- [13] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [14] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, *et al.* The biota and the world carbon budget [J]. *Science*, 1978, **199**(4325): 141-146.
- [15] Bono A, Alvarez R, Buschiazzo D E, *et al.* Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**(4): 1140-1149.
- [16] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, **25**(11): 2883-2887.
- [17] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(6): 1471-1476.
- [18] 王同朝, 卫丽, 田原, 等. 冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(9): 1970-1974.
- [19] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2815-2820.
- [20] 张赛, 罗海秀, 王龙昌, 等. 保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(8): 913-920.
- [21] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(3): 719-733.
- [22] 吴会军, 蔡典雄. 土壤呼吸组分测定技术与农田管理措施影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (6): 10-15.
- [23] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5254-5261.
- [24] Kou T J, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil and root respiration in winter wheat by using a respiration partitioning chamber [J]. *Plant and Soil*, 2007, **299**(1-2): 237-249.
- [25] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 14-20.
- [26] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [27] Hollinger S E, Bernacchi C J, Meyers T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**(1-2): 59-69.
- [28] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(5): 874-879.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing | LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031) |
| Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045) |
| Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway | BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052) |
| Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region | MA Juan-juan, LI Zhen (2060) |
| Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter | SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067) |
| Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks | XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075) |
| Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups | WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085) |
| Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water | SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091) |
| Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River | TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099) |
| Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment | YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108) |
| Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis | GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114) |
| Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application | ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120) |
| Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil | CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129) |
| Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed | LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139) |
| Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town | ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148) |
| Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water | YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156) |
| Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance | WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164) |
| Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal | WANG Shang, LI Da-peng (2171) |
| Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment | LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178) |
| Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension | WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185) |
| Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury | ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193) |
| Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon | LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201) |
| Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation | LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209) |
| AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park | TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216) |
| Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres | YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223) |
| Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor | LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230) |
| Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification | TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236) |
| Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor | SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241) |
| Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride | ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249) |
| Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake | GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256) |
| Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission | LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264) |
| Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory | TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272) |
| Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China | WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281) |
| Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex | ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287) |
| Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition | ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294) |
| Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella | ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300) |
| Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake | LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305) |
| Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments | WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314) |
| Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments | TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322) |
| Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP | WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328) |
| Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability | TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334) |
| Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier | WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341) |
| Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato | JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349) |
| Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta | LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358) |
| Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China | JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365) |
| Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes | ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374) |
| Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil | CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381) |
| Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation | ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392) |
| Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province | ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401) |
| Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification | OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411) |
| Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage | ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419) |
| Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest | WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426) |
| Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor | LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433) |

《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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