

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

^{13}C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入

孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要: 研究冬小麦生长向地下部分的输入对于土壤固碳和作物生产具有重要意义. 分别在分蘖期、拔节期、花期和灌浆期, 用 $^{13}\text{CO}_2$ 对冬小麦进行脉冲标记7 h, 标记结束后28 d(示踪期)破坏性取样, 测定冬小麦地上部、根、土壤和土壤呼吸中的 ^{13}C 含量等指标. 研究表明, 在各标记时期, 冬小麦光合固定的 ^{13}C 大部分保留在地上部(51.6%~90.8%), 且随小麦生长的进行而逐渐向地上部分分配, 向地下部分(根系、土壤和根际呼吸)的转移随生长进程的延续而降低. 转移到地下部的 ^{13}C 中, 有22.9%~65.3%被根际呼吸消耗, 24.3%~59.3%在根部保存, 10.4%~17.8%通过根际沉积转化为土壤有机碳. 示踪期28 d内最后2 d呼吸产生的 ^{13}C 只占整个示踪期根际呼吸 ^{13}C 量的0.7%~2.7%, 说明28 d的示踪期可以确保光合碳在各系统分配完全. 在整个生育期内, 冬小麦净吸收的光合碳分配到地上部、根部、土壤有机碳和根际呼吸的比例分别为78.5%、6.0%、3.1%和12.4%. 结合当地生产方式估算, 冬小麦在整个生育期内输入到地下的总碳量为 $1.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中有 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 被根际呼吸消耗, 根部固持碳量为 $0.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $0.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以有机碳沉积的形式进入土壤.

关键词: 冬小麦; 土壤有机碳; ^{13}C 脉冲标记; 根际沉积; 根际呼吸

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2837-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201710159

Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ^{13}C Pulse-labeling

SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Evaluating the allocation of carbon (C) photosynthesized by winter wheat belowground is essential for C sequestration in soil and crop production. During the four growth stages of winter wheat, i. e., tillering, elongation, anthesis, and grain-filling, the method of $^{13}\text{CO}_2$ pulse-labeling for the wheat was adopted. Destructive samplings were undertaken at 28 d after each labeling and the total C and ^{13}C contents of shoots, roots, soil, and rhizosphere respiration were determined. Results showed that the majority of the fixed ^{13}C was recovered in the aboveground (straw and grain), ranging from 51.6% to 90.8% in all growth stages. The allocation of ^{13}C photosynthesized belowground (roots, soil, and rhizosphere respiration) decreased as the wheat growth advanced, while the ^{13}C transferred to the aboveground increased. Of the total ^{13}C input belowground, 22.9%-65.3% was respired by the rhizosphere, 24.3%-59.3% remained in the roots, and 10.4%-17.8% was incorporated into the soil organic carbon by rhizodeposition. Respired ^{13}C within the last 2 d of the whole chase period (28 d) only accounted for 0.7%-2.7% of the total respired ^{13}C , indicating that 28 days were long enough to ensure a complete distribution of photosynthesized C within all the wheat and soil pools. For the whole growth season of winter wheat, the photosynthesized C allocated aboveground, to roots, soil organic carbon, and rhizosphere respiration was 78.5%, 6.0%, 3.1%, and 12.4% of the net assimilated C, respectively. Based on local wheat production, the total C transferred belowground was quantified as $1.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, with $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ respired as rhizosphere respiration, $0.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ retained in roots, and $0.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ incorporated into soil organic carbon.

Key words: winter wheat; soil organic carbon; ^{13}C pulse-labeling; rhizodeposition; rhizosphere respiration

华北平原是中国主要的冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 产区, 产量占国内总产量的2/3^[1], 研究该区域冬小麦生产对于土壤有机碳的影响具有重要科学和实践价值. 农田土壤的有机碳主要来自作物, 除根和茎叶残留之外, 活体植物分泌的根系分泌物(根系脱落物和根系分泌物)也是土壤有机碳的重要来源^[2, 3]. 来自植物凋落物的碳比较容易定量^[2], 但对于根系分泌物利用传统洗根法则较为困

难, 主要由于以下原因: ①在一定时间内, 根系淀粉含量远低于土壤中已存在的其他有机物质(如植物凋落物、半分解的有机物和土壤生物的代谢产

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2017-11-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800605); 国家自然科学基金项目(31370527, 31370527, 0870414)

作者简介: 孙昭安(1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮循环, E-mail: sun.zhaoan@163.com

* 通信作者, E-mail: mengfq@cau.edu.cn

物等)^[2]; ②通过根释放到土壤的有机物半衰期为 0.5 ~ 10 d, 根系淀积碳在土壤中很快被分解^[2]; ③根系淀积物只存在于靠近根表面一个很小的区域内, 分离非常困难^[2]. 碳同位素标记法是利用碳同位素在植物体内和土壤有机物中的差别, 被很多学者广泛用于定量根系淀积物和根际呼吸的碳量(区分土壤呼吸), 进而定量植物地上部转移到根系和土壤的总光合碳量^[2, 4~6]. 通过标记植物法所获得的试验结果比洗根法或根系生长评估法高 3 ~ 7 倍^[2].

在诸多碳同位素中, ^{13}C 不需安全防护, 且 ^{13}C 与 ^{12}C 的性质差异, 比 ^{14}C 与 ^{12}C 要小, 因而 ^{13}C 被视为更可靠的示踪物^[7]. 与连续标记法相比, 脉冲标记比较容易掌握, 设备要求简单、费用低, 能够提供植物各生育时期光合碳的分配信息^[8, 9]. 虽然一次脉冲标记得到的碳同位素分配信息不能代表植物整个生育期, 但只要植物在生育期内进行一系列标记, 就可以合理地估计植物输入地下各组分的碳量^[2, 6, 10~13]. 因此, 本研究选择 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记方法, 来定量分析华北平原冬小麦生长对于地下部分碳的贡献.

目前, 国内外同行在冬小麦碳同位素脉冲标记研究方面获得了很多数据, 但由于标记方法和试验条件不同, 所获得的试验结果有很大差异, 且可比性差, 更不能直接应用于国内的农田土壤. 此外, 由于技术条件的限制, 国内冬小麦碳标记的定量输入的研究开展较少, 仅有屈波等^[14] 和齐鑫等^[15] 分别使用 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记法的研究. 因此, 本研究选择在长示踪期条件下, 探究冬小麦不同生育时期光合碳在植物-土壤系统中的分配, 定量冬小麦向地下各组分转移的光合碳, 以期为我国农田土壤碳分配增加数据积累, 加深对冬小麦-土壤系统中地下部碳平衡过程的理解, 对于我国农业固碳减排具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 冬小麦种植

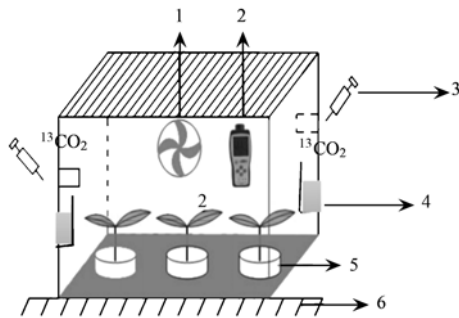
试验于中国农业大学桓台试验站田间进行, 站点坐标为 E117°59', N36°57', 海拔高度为 18 m. 所选盆(PVC 柱)大小为 20 cm × 30 cm(直径 × 高度). 供试土壤取自试验站农田(0 ~ 20 cm), 土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -24‰. 供试土壤为潮土类沙壤土质^[16], 相关土壤参数为: 土壤有机碳 8.4 g·kg⁻¹, 土壤无机碳 5.2 g·kg⁻¹, 全氮 0.67 g·kg⁻¹, pH 值

=8.2(水土比为 2.5:1), 速效钾 174 mg·kg⁻¹, 速效磷 5.2 mg·kg⁻¹. 土壤风干后, 磨碎、挑根, 再过 5 mm 筛. 每盆装风干土 8.7 kg(土深 23 cm 左右). 磷肥和钾肥(KH_2PO_4)作为底肥一次性施入, 氮肥作为底肥、拔节肥 2 次施入尿素(含氮量为 46%), 两次施用量的比例均为 50%, 用量分别为 P_2O_5 78 mg·kg⁻¹、 K_2O 43 mg·kg⁻¹ 和 N 90 mg·kg⁻¹. 供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L., 鲁源 502). 冬小麦种子播种前放在清水中浸泡 10h, 然后再浅埋入土壤中. 2014 年 10 月 15 日播种, 每盆 10 粒, 出苗一周后, 每盆留 6 株. 用称重法分别控制土壤水分田间持水量的 75%. 小麦生长期, 根据病虫害情况, 喷洒必要的农药.

1.2 ^{13}C 脉冲标记

分别在播种后 75 d(分蘖期)、168 d(拔节期)、188 d(花期)和 202 d(灌浆期)进行 4 次标记. 每次选取 4 盆小麦, 放入标记室进行 ^{13}C 脉冲标记(图 1). ①标记前, 连接 CO_2 吸收装置, 让标记过程中根际呼吸产生的 $^{13}\text{CO}_2$ 汇聚在盆内; ②将盆内土壤和隔板间的空气与标记室空气隔开, 把隔板和 PVC 柱的接合处用凡士林密封, 并在小麦基部与隔板的间隙中涂上凡士林密封; ③检查密闭性: 把气球套在一空心管上, 在另一端管口用吸耳球鼓气, 根据气球膨胀状态判定密封性好坏. 然后把空心管管口堵住; ④将风扇、小麦植株和 ^{13}C 丰度为 99% 的 $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 放入标记室内, 然后将整个标记室密封; ⑤标记于上午 09:00 点开始, 用注射器向装有 $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 的烧杯中注入一定量 1 mol·L⁻¹ 的 H_2SO_4 溶液(根据 $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 计算好硫酸的用量), 标记开始. 此后每隔一段时间, 根据 CO_2 检测仪的读数来确定是否加入硫酸, 当低于 200×10^{-6} 时, 向烧杯中注入 1 次硫酸, 以维持 CO_2 体积分数在 360×10^{-6} 左右, 标记时间持续 7 h; ⑥标记结束后, 标记罩子内残留的 $^{13}\text{CO}_2$ 气体通过气泵和 NaOH 溶液回收(回收 0.5 h)^[6, 17].

脉冲标记的示踪时间应足够长, 以保证小麦在标记时吸收的标记 ^{13}C 在小麦-土壤整个系统完全分配^[6, 13, 18], 过早取样, 会高估进入到土壤有机碳中的碳量, 低估根际呼吸消耗的碳; 取样过晚, 又徒增收集土壤呼吸的劳动量, 给试验的顺利进行增加难度, 增加费用. 结合其他研究者的结果, 冬小麦光合固定的 ^{14}C 在小麦-土壤整个系统分配至少需要 19 d^[18], 示踪期宜长不宜短, 因此, 本试验选择了



1. 小风扇; 2. CO_2 浓度检测仪; 3. 注射 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液;
4. $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 溶液; 5. 盆栽小麦; 6. 土壤

图1 标记装置

Fig. 1 Labeling apparatus

28 d 的示踪期。

1.3 取样

标记结束后, 每 2 ~ 5 d 更换 1 次 NaOH 溶液。每天定时用空气泵在土壤与隔板间注入一定量无 CO_2 的空气, 用于提供氧气。标记结束后第 28 d, 对小麦进行破坏性取样。从基部剪断小麦植株, 将全部土壤反复过 2 mm 筛, 挑出根系, 并把土壤平铺于农用地膜上。把挑出的根连同附着于根上的土壤用水浸泡, 轻轻振荡, 20 min 后, 过 1 mm 筛, 并把筛上的根系冲洗干净。然后把浸泡和冲洗小麦根的用水、沉淀的泥浆均匀地洒在平铺于地膜上的土壤中。将土壤用多次划网格取样的方式缩分, 最后取约 50 g 土壤。将小麦地上部和根分别置于 105°C 下杀青 30 min, 60°C 下烘干至恒重。

1.4 分析和测定

1.4.1 土壤呼吸 ^{13}C 丰度的样品制备

把 28 d 内 9 次 (第 2、4、7、11、14、17、20、26 和 28 d) 用于固定呼吸的 NaOH 溶液, 等体积混合 (每次吸取 10 mL), 将过量 SrCl_2 加入到 28 d 内混合 NaOH 溶液和最后 2 d 的 NaOH 溶液中 (26 ~ 28 d), 形成 SrCO_3 沉淀。以酚酞作指示剂, 用稀盐酸滴定未与 CO_2 反应的 NaOH , 根据稀盐酸和 NaOH 的体积、浓度计算吸收的 CO_2 量。将沉淀的 SrCO_3 搅拌混匀, 60°C 下烘干至恒重。

1.4.2 土壤有机碳 ^{13}C 丰度的样品制备

从 50 g 土壤样品中取约 20 g 土壤置于白色平板上, 挑去残留细根。然后, 将其浸泡在 100 mL 去离子水中振荡 30 min, 使土壤中水溶性有机碳充分溶解于水。土壤溶液静置一段时间后, 将上清液收集于烧杯内, 防止在以后冲洗 HCl 时, 损失水溶性有机碳。再往泥浆中加入 50 mL $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液, 用于去除泥浆中的碳酸盐。摇匀后放入振荡

器以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 后, 静置 12 h; 缓缓将上清液倒掉, 用去离子水洗去土样中的酸, 加入去离子水, 充分搅拌均匀并静置一段时间后, 放入离心机中以 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速离心 3 min, 将上清液倒掉, 重复此过程, 用 pH 试纸检测上清液的 pH 值, 洗到中性为止, 并把酸化前的上清液倒回烧杯中, 在 60°C 条件下烘干^[6,19]。

1.4.3 冬小麦植株、土壤和土壤呼吸 ^{13}C 丰度的测定

测定之前利用球磨仪 (Restol MM2000, Retsch, Haan, Germany) 研磨 ($< 500 \mu\text{m}$)。上述各类样品 ^{13}C 丰度, 分别在 DELTA^{plus} XP 型质谱仪 (DELTA^{plus} XP, ThermoFinnigan, Bremen, Germany) 中测定。利用 Thermo Elemental Analyzer 1112 元素分析仪测定植物碳含量和土壤有机碳含量。碳同位素采用 PDB (Peedee Belemnite) 标准。

1.5 计算方法

冬小麦光合固定的 ^{13}C 最终进入到小麦地上部、根部、土壤有机碳和土壤呼吸这 4 个组分中。进入各个组分的 ^{13}C 量 ($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)^[6,15]:

$$^{13}\text{C}_i = C_i \times \frac{F_i - F_m}{100} \times 1000 \quad (1)$$

式中, $^{13}\text{C}_i$ 为各组分的 ^{13}C 量, C_i 为各组分的碳量, F_i 和 F_m 为各组分标记和不标记的 ^{13}C 丰度。

冬小麦净吸收的 ^{13}C 量计算公式为^[6]:

$$^{13}\text{C}_{\text{净吸收}} = ^{13}\text{C}_{\text{地上部}} + ^{13}\text{C}_{\text{根部}} + ^{13}\text{C}_{\text{土壤有机碳}} + ^{13}\text{C}_{\text{根际呼吸}} \quad (2)$$

^{13}C 在各组分的分配比例 (%) :

$$^{13}\text{C}_i = \frac{^{13}\text{C}_i}{^{13}\text{C}_{\text{净吸收}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $^{13}\text{C}_i\%$ 为该组分的 ^{13}C 量占净吸收 ^{13}C 量的百分比, %。

各个时期输入到各个组分的碳量 ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)^[6,20,21]:

$$\text{SC}_i = \Delta\text{C}_{\text{地上部}} \times \frac{^{13}\text{C}_i(\%)}{^{13}\text{C}_{\text{地上部}}(\%)} \quad (4)$$

式中, $\Delta\text{C}_{\text{地上部}}$ 为每一生育时期地上部碳量的变化量, 以地上部作为参照是考虑到地上部的生物量和含碳量可以准确定量。

本研究使用上述公式计算小麦根际呼吸、输入到土壤有机碳和根的光合碳量, 是基于下列理论: 本试验中 4 次标记 ^{13}C 的分配规律, 分别代表冬小麦分蘖期、拔节期、开花期和灌浆期各自吸收光合碳的平均分配规律。该计算方法虽然是一个估算, 但这种估算对于研究植物-土壤系统的碳平衡很有意义^[22]。

1.6 数据分析

方差分析用 SPSS 17.0 软件计算. 同一组分不同生育期的干物质累积量、根冠比、地上部占植株总质量的比例、 ^{13}C 分配比例和输入到地下各组分碳量之间的显著性差异分析均设为 $P < 0.05$ 水平, 且平均值比较采用最小显著差异法 (least significant difference, LSD). 制图采用 Excel 2013 软件.

2 结果与分析

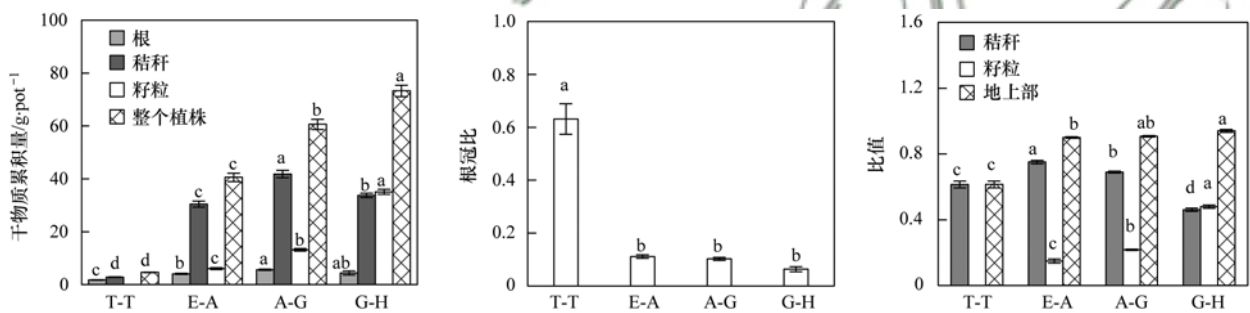
2.1 不同生育期冬小麦的干物质累积量

冬小麦的干物质累积量随着生育期的增长而增加 [图 2(a)]. 冬小麦根冠比随生育期的增长而下降, 由分蘖期的 0.63 显著下降到花期的 0.14, 然后在后 3 个生育时期保持稳定 [图 2(b)]. 冬小麦地上部生物量占植株总重的比例随生育期的增长而降低, 由分蘖期的 0.62 增加到收获期的 0.94. 在后 3 个生育期, 随着生育期的增长, 籽粒占整个植株总重的比例而增加 (从花期的 0.30 上升到收获期的

0.56), 秸秆占植株总重的比例而下降, 从花期的 0.60 下降到收获期的 0.38 [图 2(c)].

2.2 不同生育期光合固定的 ^{13}C 在冬小麦-土壤系统中的分配

光合固定的 ^{13}C 大部分 (质量分数 64.3% ~ 90.3%) 保留在地上部 (籽粒 + 秸秆), 随着生育期的增长而增加, 即从分蘖期的 64.3% 增加到灌浆期的 90.3% (图 3). 随着生育期的增长, 光合固定的 ^{13}C 在籽粒中的比例增加, 从拔节期的 5.1% 增加到灌浆期的 60.9%, 在秸秆中的分配反而下降 (从拔节期的 67.9% 下降到灌浆期的 29.4%). 在地下部的 ^{13}C 比例与在地上部的截然相反: 分配到地下部 (根 + 土壤有机碳 + 根际呼吸) 的 ^{13}C 比例随生育期的增长而降低, 由分蘖期的 35.7% 下降到灌浆期的 9.7%, 根、土壤有机碳和根际呼吸中 ^{13}C 的比例也是随生育期的增长而降低. 除分蘖期外, 在其它 3 个生育期, 地下部各个组分的 ^{13}C 比例在根际呼吸最大, 土壤中最小, 在分蘖期, 根中的比例最大, 土壤中的最小.



T-T、E-A、A-G 和 G-H 分别代表在分蘖期标记-分蘖期收样、拔节期标记-开花期收样、花期标记-灌浆期收样和灌浆期标记-收获期收样; 不同小写字母表示同一组分不同生育期间的显著性差异 ($P < 0.05$)

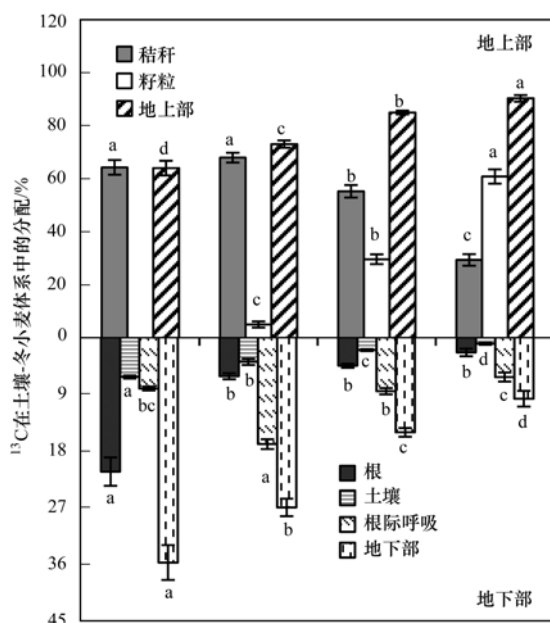
图 2 冬小麦不同生育时期的干物质累积量、根冠比和地上部占植株总重的比值

Fig. 2 Dry weight accumulation, root/shoot, and shoot/total plant weight of winter wheat at different growth stages

在 4 个生育期, 冬小麦向地下部转移的 ^{13}C 分别占净吸收量的质量分数为 35.7%、27.0%、15.1% 和 9.7% (图 3). 在向地下部转移的 ^{13}C 中 (图 4), 大部分 ^{13}C 都被根际呼吸所消耗 (除分蘖期外), 在灌浆期时达到最大 (65.3%), 在花期最小 (56.7%), 并且拔节期 (62.9%) 和花期之间无显著差异. 分配到根的 ^{13}C 与根际呼吸则相反, 随生育期的增长而下降, 在分蘖期最高 (59.3%), 在灌浆期仅为 24.3%. 进入土壤有机碳的 ^{13}C 比例在分蘖期最高 (17.8%), 显著高于后 3 个生育期的比例 (10.4% ~ 14.3% 之间), 在拔节期和花期之间无显著差异, 显著高于灌浆期的比例. 示踪期 28 d 最后 2 d 产生的 ^{13}C 只占整个示踪期根际呼吸产生 ^{13}C 量的 0.7% ~ 2.7% (图 5).

2.3 冬小麦输入到地下各组分的碳量

冬小麦根际呼吸碳量在拔节期最高, 为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 其余 3 个生育时期在 $0.2 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 之间, 整个生育期内根际呼吸总碳量为 $4.6 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ (图 6). 冬小麦根系通过根际沉积, 将一部分光合碳转化为土壤有机碳, 也是在拔节期最高, 为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 其余 3 个生育期则较低 ($0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$), 且生育期之间无显著差异, 冬小麦在整个生育期内向土壤有机碳中输入的光合碳量为 $1.1 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$. 在整个生育期内, 冬小麦用于根系组织建成的总碳量为 $2.2 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 因此, 冬小麦在整个生育期内输入到地下部的的光合碳量为 $8.0 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ [输入地下部的碳量 = 根 ($2.2 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$) + 土壤有机碳 ($1.1 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$) + 根际呼吸 ($4.6 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$); 图 6], 占



T、E、A 和 G 分别代表在分蘖期标记、拔节期标记、花期标记和灌浆期标记, 下同

图3 光合 ^{13}C 在土壤-冬小麦体系各组分中的分配 (平均值 $\pm$ SE)

Fig. 3 Proportion (mean $\pm$ SE) of photosynthesized ^{13}C in each component of the wheat-soil system

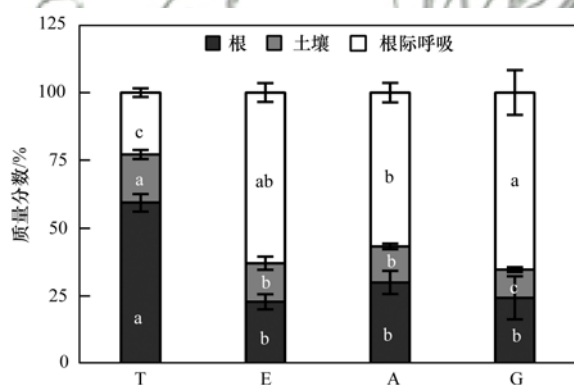


图4 输入到地下部分的光合 ^{13}C 在地下各组分中的分配

Fig. 4 Proportion of photosynthesized ^{13}C input belowground in each component belowground

净吸收光合碳量的 21.5% [净吸收光合碳量 = 地上部 ($29.2 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$) + 地下部 ($8.0 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)]. 冬小麦在整个生育期内输入到地上部、根部、土壤有机碳和根际呼吸中的光合碳量, 分别占净吸收光合碳量的比例为 78.5%、6.0%、3.1% 和 12.4% (表 1).

结合冬小麦整个生育期的分配比例 (表 1), 以华北平原小麦地上部干重 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [23]、含碳量 42% 计算, 冬小麦在整个生育期内输入到地下部的总碳量为 $1.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 被根际呼

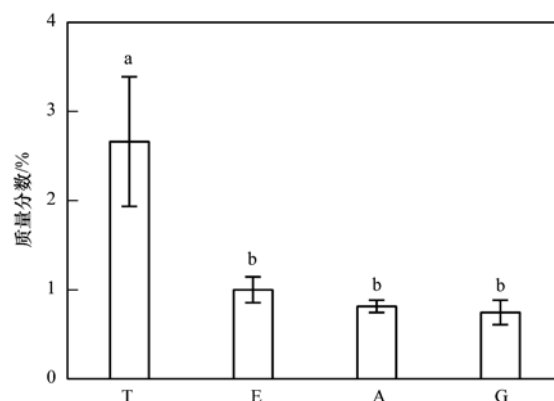
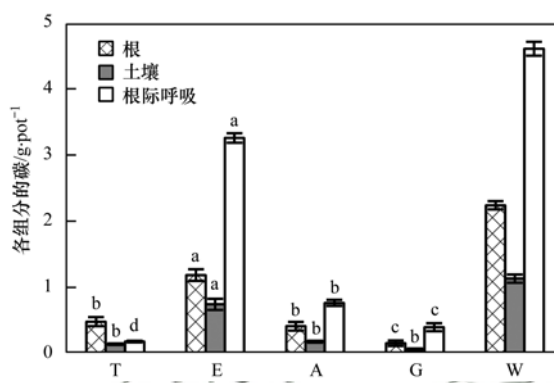


图5 示踪期最后 2 d 占到总呼吸释放 ^{13}C 的比例

Fig. 5 Proportion of respired ^{13}C collected within the last 2 days in total respired ^{13}C over the whole chase period



T、E、A、G 和 W 分别代表在分蘖期、拔节期、花期、灌浆期和整个生育期输入到地下各分组的碳量

图6 小麦在生育期内输入到地下各分组的碳量 (平均值 $\pm$ SE)

Fig. 6 Net photosynthesized C inputs (mean $\pm$ SE) into each component of the wheat-soil system over the whole wheat growing season

吸消耗, 释放回大气中, 用于建成根系组织的碳量为 $0.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $0.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 则转化为土壤有机碳.

3 讨论

3.1 不同生育期冬小麦光合碳的分配规律

冬小麦生长时期不同, 光合产物的分配规律各异 [5, 24]. 本试验中光合固定的 ^{13}C 大部分保留在植株地上部 (64.3% ~ 90.3%), 随生育期的增长, 地上部的光合碳数量和比例不断增加, 而向地下部比例则不断减少, 如地上部光合碳从分蘖期的 64.3% 上升到灌浆期的 90.3%, 地下部光合碳由分蘖期的 35.7% 下降到灌浆期的 9.7% (图 3). 这和其他研究者小麦各个关键生育期的标记结果平均值 (51.6% ~ 90.8%) [9, 10, 18, 21, 25] 比较接近 (表 1), 和地上部向地下部转移的碳分配变化规律相同. 这是因为小麦生育前期根系碳库活力高, 需转运更多的

碳,而到成熟期则向籽粒中分配较多^[10,18].本研究冬小麦生长前期向地下部分分配的碳量多于成熟期,小麦拔节期向地下部分分配了 30%~40% 的净光合碳,而成熟期仅有 5%~20%^[21].分配到地下部光合碳形成根系的比例也与生育时期有关:冬小麦生育前期有近 50% 光合碳用于根系构建,但成熟期仅有 10% 用于根系组织构成,其余碳通过根系呼吸及根系沉积物损失^[2,18].类似地,光合碳在土壤中的比例也随生育期呈下降趋势,但累积量则不断增加^[18].

光合碳在地下部的分配因植物类型而异:在其他禾谷类作物,如玉米^[6]、大麦^[9]和水稻上^[26]随生长进程的延长逐渐向地上部分分配,但牧草上没有类似规律^[2,27].主要原因在于,农作物经过长期的选择和进化,地上部收获指数趋于最大化,进而导致向地下部分分配的光合碳比例降低^[2,27].牧草营养

生长期长,收获后地下部根系继续生长,而禾谷类作物收获后根系逐渐死亡,造成牧草地下部的光合碳量高于禾谷类作物.禾谷类作物和牧草向地下部转运的光合碳,分别在 20%~30% 和 30%~50%^[2,21]之间.此外,根系主动吸收土壤矿质养分是一个能量消耗的过程,集约化施肥可以显著降低农作物吸收土壤养分的能量消耗,进而农作物对地下部光合碳投入也相应较低^[2].

对于禾谷类作物,向地下部转运的 20%~30% 光合碳中,约 1/2 在根系,1/3 被根系和微生物呼吸所消耗,其余 1/6 被转化为土壤微生物量和有机质^[2,21].这与本研究结果接近(21.5%;表 1),即根际呼吸比例最大,进入土壤有机碳的比例最小.但本研究的示踪期较长(28 d),更多的根际沉积物被分解和根系释放,因而根际呼吸比例偏大(58%),而残留在根系的偏小(28%;图 4).

表 1 不同生育时期脉冲标记碳在冬小麦-土壤体系的分配 (平均值±SE)/%

Table 1 Pulse labeled carbon partitioning (mean±SE) in the winter wheat-soil system at different growth stages/%

生育期	生长天数 /d	地上部	根	土壤	根际呼吸	文献
分蘖期	166	45.0	19.9	18.5	16.6	[9]
	42	50.4	12.5	8.2	29.0	[10]
	50	66.7	17.0	0.4	15.9	[21]
	37	44.1	35.3	2.6	18.0	[26]
	平均值	51.6±5.2	21.2±4.9	7.4±4.0	19.9±3.1	
拔节期	193	85.1	6.3	1.8	6.8	[9]
	77	72.1	10.5	6.2	11.2	[10]
	151	61.3	15.2	9.4	14.1	[18]
	71	71.7	22.3	1.4	4.7	[21]
平均值		72.6±4.9	13.6±3.4	4.7±1.9	9.2±2.1	
开花期	133	94.4	1.1	1.8	2.7	[10]
	179	77.3	4.8	8.5	9.4	[18]
	106	91.1	5.5	0.1	3.3	[21]
平均值		87.6±5.2	3.8±1.4	3.5±2.6	5.1±2.1	
灌浆期	255	88.8	3.6	2.2	5.5	[9]
	154	97.4	0.4	0.7	1.5	[10]
	207	85.4	2.4	5.4	6.7	[18]
	120	91.4	5.4	0.2	2.7	[21]
平均值		90.8±2.5	3.0±1.1	2.1±1.2	4.1±1.2	
整个生育期	230	78.5±0.4	6.0±0.3	3.1±0.4	12.4±0.2	本研究

3.2 试验方法

本研究中(图 5),在示踪期最后 2 d 内,只有很少部分的¹³C在冬小麦根际呼吸中出现(0.7%~2.7%),因此,26 d 后根际呼吸产生的¹³C量微小,可以忽略,即使再延长示踪期,¹³C在冬小麦-土壤系统中各组分的分配比例也不会产生显著变化,可以认为经过 4 周¹³C的分配已基本完成.关于小麦示踪期的长短,一般认为 15~21 d 的示踪期是合适

的^[18,28],其中脉冲标记法光合碳分配主要在 48 h 内进行^[28].利用稳定性碳标记,不仅可以定量根际沉积物对土壤碳的贡献,还可以区分不同土壤呼吸,定量根际释放的碳^[22].洗根法低估了植物在生长过程中输入到土壤的碳量^[2,13],如果利用传统洗根法,本研究中根际沉积转化的土壤有机碳和根际呼吸就无法定量,导致进入地下部碳被低估 58%.因此,利用稳定性碳标记,定量化作物对地下部碳

的贡献有着传统方法不具备的优势。

3.3 冬小麦输入到地下的碳量

本研究中,冬小麦输入到地下部(根+土壤有机碳+根际呼吸)总碳量为 $1.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,略高于 Kuzyakov 等^[2]汇总的结果($1.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。可能原因是,本研究是基于冬小麦整个生育期,超过 200 d,而 Kuzyakov 等^[2]的研究有 2 个研究周期超过 200 d,大部分在 100 d 左右。幼苗期,作物根系生物量较小,输入到地下部的光合碳碳量较少,远低于后期输入到地下部的数量^[2,17]。因此,在植物-土壤光合碳分配研究中,基于全生育期的标记和采样是十分必要的^[6,9]。

华北平原的农业集约化不仅增加了作物产量,还提高了土壤有机碳水平^[29],其中秸秆还田是主要原因,但作物(冬小麦+夏玉米)根际沉积作用的贡献并没有得到准确定量。结合本课题组针对夏玉米利用 $^{13}\text{CO}_2$ 脉冲标记的结果^[6]发现:在华北平原冬小麦-夏玉米周年生产体系下,作物生长过程中通过根系沉积物的形式输入碳量达到 $0.58 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [冬小麦 $0.25 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ + 夏玉米 $0.33 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],这些根际沉积碳最终成为土壤有机碳的一部分,参与到土壤生物活动^[24]。该结果是对当前我国华北平原生产水平下作物根际-土壤碳周转的首次报道,对于该地区农田土壤固碳减排、培肥地力等具有重要科学支撑和实践意义。

4 结论

(1)用 ^{13}C 脉冲标记冬小麦后,经过 4 周的示踪期, ^{13}C 在冬小麦-土壤系统中的分配已基本稳定。

(2)冬小麦光合固定的 ^{13}C 大部分保留在地上部(51.6%~90.8%),随生育期的增长,增加向地上部的分配,降低向地下部(根系、土壤和根际呼吸)的分配。

(3)在整个生育期内,冬小麦净吸收光合碳分配到地上部、根、土壤有机碳和根际呼吸中的比例分别为:78.5%、6.0%、3.1%和 12.4%。

(4)冬小麦在整个生育期内输入到地下部的的光合碳量是 $1.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中有 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 被根际呼吸消耗,根部固持碳量为 $0.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,另有 $0.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以土壤沉积的形式进入土壤。

参考文献:

- [1] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2013, **143**: 98-105.
- [2] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, **163**(4): 421-431.
- [3] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation[J]. Plant and Soil, 2005, **269**(1-2): 341-356.
- [4] Butterly C R, Armstrong R, Chen D L, et al. Carbon and nitrogen partitioning of wheat and field pea grown with two nitrogen levels under elevated CO_2 [J]. Plant and Soil, 2015, **391**(1-2): 367-382.
- [5] Chowdhury S, Farrell M, Bolan N. Photoassimilated carbon allocation in a wheat plant-soil system as affected by soil fertility and land-use history[J]. Plant and Soil, 2014, **383**(1-2): 173-189.
- [6] Meng F Q, Dungait J A J, Zhang X, et al. Investigation of photosynthate-C allocation 27 days after ^{13}C -pulse labeling of *Zea mays* L. at different growth stages[J]. Plant and Soil, 2013, **373**(1-2): 755-764.
- [7] Simard S W, Durall D M, Jones M D. Carbon allocation and carbon transfer between *Betula papyrifera* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings using a ^{13}C pulse-labeling method[J]. Plant and Soil, 1997, **191**(1): 41-55.
- [8] Roper M M, Fillery I R P, Jongepier R, et al. Allocation into soil organic matter fractions of ^{14}C captured via photosynthesis by two perennial grass pastures[J]. Soil Research, 2013, **51**(8): 748-759.
- [9] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs integrated farming[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 811-820.
- [10] Keith H, Oades J M, Martin J K. Input of carbon to soil from wheat plants[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1986, **18**(4): 445-449.
- [11] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. Rhizosphere carbon fluxes in field-grown spring wheat: model calculations based on ^{14}C partitioning after pulse-labelling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, **26**(2): 171-182.
- [12] Warembourg F R, Estelrich H D. Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere: a time-dependent approach using carbon-14[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **30**(5-6): 528-534.
- [13] Kuzyakov Y, Kretschmar A, Stahr K. Contribution of Lolium perenne rhizodeposition to carbon turnover of pasture soil[J]. Plant and Soil, 1999, **213**(1-2): 127-136.
- [14] 屈波, 孟凡乔, 齐孟文, 等. 华北高产农田生态系统中冬小麦分蘖期生长与碳截留[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(1): 25-30.
- [15] Qu B, Meng F Q, Qi M W, et al. Growth and carbon sequestration of winter wheat at its tillering stage in high yield farm ecosystem of North China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(1): 25-30.
- [16] 齐鑫, 王敬国. 应用 ^{13}C 脉冲标记方法研究不同施氮量对冬小麦净光合碳分配及其向地下输入的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2524-2530.
- [17] Qi X, Wang J G. Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with ^{13}C for winter wheat (*Triticum aestivum* L.), as affected by nitrogen supply[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(6): 2524-2530.

- [16] Shi Y F, Wu W L, Meng F Q, *et al.* Integrated management practices significantly affect N_2O emissions and wheat-maize production at field scale in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, **95**(2): 203-218.
- [17] Tian J, Pausch J, Fan M S, *et al.* Allocation and dynamics of assimilated carbon in rice-soil system depending on water management[J]. *Plant and Soil*, 2013, **363**(1-2): 273-285.
- [18] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. ^{14}C pulse-labelling of field-grown spring wheat: an evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(2): 161-170.
- [19] 石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 301-308.
Shi X X, Zhao Y, Zhang L, *et al.* Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 301-308.
- [20] Werth M, Kuzyakov Y. Root-derived carbon in soil respiration and microbial biomass determined by ^{14}C and ^{13}C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 625-637.
- [21] Gregory P J, Atwell B J. The fate of carbon in pulse-labelled crops of barley and wheat[J]. *Plant and Soil*, 1991, **136**(2): 205-213.
- [22] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 446-453.
He M Y, Meng F Q, Shi Y J, *et al.* Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following ^{13}C pulse-labeling[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 446-453.
- [23] Jia S L, Wang X B, Yang Y M, *et al.* Fate of labeled urea- ^{15}N as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain: I winter wheat [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **90**(3): 331-346.
- [24] Jin J, Wang G H, Liu J D, *et al.* Seasonal allocation of photosynthetically fixed carbon to the soybean-grown Mollisols in Northeast China[J]. *Crop and Pasture Science*, 2011, **62**(7): 563-570.
- [25] Lodhi A, Sajjad M H, Mahmood A, *et al.* Photosynthate partitioning in wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by root-zone salinity and form of N[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2009, **41**(3): 1363-1372.
- [26] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice soil [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(4): 1085.
- [27] Hafner S, Unteregelsbacher S, Seeber E, *et al.* Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by $^{13}CO_2$ pulse labeling [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(2): 528-538.
- [28] Derrien D, Marol C, Balesdent J. The dynamics of neutral sugars in the rhizosphere of wheat. An approach by ^{13}C pulse-labelling and GC/C/IRMS[J]. *Plant and Soil*, 2004, **267**(1-2): 243-253.
- [29] Liao Y, Wu W L, Meng F Q, *et al.* Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(5): 1403-1413.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)