

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

**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

餐饮行业细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)排放测算方法:以上海市为例 ..... 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM<sub>2.5</sub>中有机物的组分特征、空间分布和来源 ..... 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机盐季节变化及来源分析 ..... 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征及来源解析 ..... 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 ..... 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 ..... 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 ..... 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 ..... 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 ..... 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 ..... 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 ..... 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 ..... 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 ..... 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 ..... 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 ..... 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 ..... 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 ..... 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 ..... 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 ..... 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 ..... 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 ..... 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 ..... 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 ..... 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 ..... 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 ..... 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 ..... 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 ..... 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 ..... 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 ..... 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 ..... 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR ..... 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 ..... 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 ..... 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 ..... 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 ..... 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 ..... 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N<sub>2</sub>O生成与迁移特征及其影响因素 ..... 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>排放特征及其影响因素分析 ..... 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O特征 ..... 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO<sub>2</sub>通量特征 ..... 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 ..... 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 ..... 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 ..... 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 ..... 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 ..... 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 ..... 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 ..... 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 ..... 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 ..... 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 ..... 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗生内生菌的筛选与鉴定 ..... 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 ..... 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 ..... 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM<sub>2.5</sub>健康效应 ..... 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM<sub>2.5</sub>污染空间分布的社会经济影响因素分析 ..... 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

# 黄土高原成龄苹果园生态系统 CO<sub>2</sub> 通量特征

杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森\*

(西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 黄土高原地区是中国和世界苹果 (*Malus domestica*) 集中连片栽培面积最大的区域, 在生态环境改善中发挥了重要作用, 然而关于黄土高原地区苹果园生态系统尺度上的碳通量研究很少. 在本研究中, 利用涡度相关技术对我国陕西黄土高原地区成龄苹果园生态系统的 CO<sub>2</sub> 通量和气象因素进行了观测. 基于 2016 年 1 月到 2016 年 12 月的观测数据, 定量分析了此苹果园净生态系统碳交换 (NEE)、生态系统呼吸 ( $R_{\text{eco}}$ ) 和生态系统总初级生产力 (GPP) 不同时间尺度及主要气象因素的变化, 探究了光合有效辐射 (PAR) 和不同层次土壤温度 ( $T_s$ )、空气温度 ( $T_a$ ) 对 NEE 的影响. 结果表明, 苹果园生态系统 NEE 月总量在非果树生长季 12、1、2 和 3 月为正值 (表现为碳源), 生长季 (4~11 月) 均为负值 (表现为碳汇), 整体表现为强烈的碳汇. 生长季 NEE 月平均日变化在 8 月出现最大吸收峰 [ $-17.08 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ], 11 月吸收峰最小 [ $-4.47 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ]; 在非生长季 NEE 的月平均日变化非常微弱, 昼夜变化不明显. GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 日总量的最大值分别为 11.12、5.04 和  $-7.34 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ . GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 月总量的最大值分别为 238.97、105.38 和  $-144.44 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{月})^{-1}$ , 月 GPP 和 NEE 总量在 5~8 月保持相对稳定的高值. 全年 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 分别为 1223.2、525.2 和  $-698.0 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 表明我国黄土高原地区的成龄苹果园生态系统具有相对较高的固碳能力. 夜间生态系统呼吸  $R_{\text{eco},n}$  与不同层次土壤温度、空气温度之间呈正相关关系, 相关系数表现为  $T_{s-5\text{cm}} > T_{s-10\text{cm}} > T_{a-4\text{m}} > T_{a-8\text{m}}$ ; 光合有效辐射 PAR 可以解释白天 NEE 变化的 80% 以上.

**关键词:** 黄土高原; 苹果园; 涡度相关; CO<sub>2</sub> 通量; 碳汇

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2339-12 DOI: 10.13227/j.hjks.201709216

## Characteristics of CO<sub>2</sub> Flux in a Mature Apple (*Malus domestica*) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau

YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, DUAN Yu-min, QI Xiang-ning, ZHANG Lin-sen\*

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Apples (*Malus domestica*) in the Loess Plateau region are grown in the largest apple orchards in the world and China, playing an important role in the improvement of the ecological environment. However, there is little research on the scale of the ecological system of the apple orchard in the Loess Plateau region. In this study, the CO<sub>2</sub> flux of a mature apple orchard in the Loess Plateau region was observed using an eddy covariance technique in the Shannxi Province. Based on the observation data sets observed from January 2016 to December 2016, a quantitative analysis of the apple orchard net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration ( $R_{\text{eco}}$ ), total ecosystem primary productivity (GPP) changes at different time scales, changes in main meteorological factors, the effects of soil temperature ( $T_s$ ) and air temperature ( $T_a$ ) at different levels, and PAR on NEE were discussed. The results showed that during the study period, the apple orchard ecosystem NEE monthly totals were positive (as a carbon source) in the non-growing season in December, January, February and March, were negative (a carbon sink) in the growing season from April to November, and functioned as a strong carbon sink year round. The maximum peak NEE (absolute value) monthly average daily change appeared in August [ $-17.08 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ], and the smallest peak appeared in November [ $-4.47 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ] during the growing season. The NEE monthly average daily change value during the non-growing season is very weak, though the change is not obvious. GPP,  $R_{\text{eco}}$ , and NEE maximum daily total values were 11.12, 5.04, and  $-7.34 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ , respectively. GPP,  $R_{\text{eco}}$ , and NEE maximum monthly total values were 238.97, 105.38, and  $-144.44 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{month})^{-1}$ , respectively, as GPP and NEE maintained high cumulative values that were relatively stable from May through August. The annual GPP,  $R_{\text{eco}}$ , and NEE were 1223.2, 525.2, and  $-698.0 \text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ . The observations show that the mature apple orchard ecosystem in the Chinese Loess Plateau has a relatively high carbon sequestration capacity. Nighttime ecosystem respiration  $R_{\text{eco},n}$  was positively correlated with the soil temperature and air temperature at different levels, and the correlation coefficients were  $T_{s-5\text{cm}} > T_{s-10\text{cm}} > T_{a-4\text{m}} > T_{a-8\text{m}}$ . The photosynthetic active radiation (PAR) can explain more than 80% of the daytime NEE changes.

**Key words:** Loess Plateau; apple orchard; eddy covariance; CO<sub>2</sub> flux; carbon sink

收稿日期: 2017-09-25; 修订日期: 2017-11-17

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-27); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2015KJZDNY02-03-02); 农业部农业行业专项 (Nyhzyx07-024)

作者简介: 杨剑锋 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为黄土高原成龄苹果园水碳通量, E-mail: yangjianfeng1992@126.com

\* 通信作者, E-mail: linsenzhang@163.com

大气中二氧化碳浓度增加对全球温度升高的影响越来越强烈,关注全球尺度碳预算的文献和研究也日益增加<sup>[1]</sup>. 陆地生态系统由于下表面的复杂多样性和人类活动的强烈干扰,造成了该生态系统碳循环具有明显地域特征和不确定性,目前对陆地生态系统碳循环规律、源汇分布和影响因素的研究已经成为全球碳循环研究的主要内容<sup>[2~4]</sup>. 近些年在纬度 70°N~30°S 地区,建立了以涡度相关为主要研究方法的通量网络,实时对 CO<sub>2</sub>、水和热通量进行了观测,研究对象主要集中于温带针叶林、落叶阔叶林、常绿森林、一年生作物、草地、湿地和冻原<sup>[5]</sup>. 农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分<sup>[6]</sup>,占全球陆地面积 10.5%,受到强烈的人为干扰,是碳库中最活跃的部分<sup>[7]</sup>. 果园是农田生态系统重要土地利用类型,开展果园生态系统碳收支和影响因素的研究,是完整探讨整个陆地生态系统功能必不可少的内容.

近些年随着果树作物经济效益的提高,我国水果优势产区大量麦田和玉米田已经转变为果园,2015 年中国果园种植面积达到 1 282 万 hm<sup>2</sup>,约占耕地面积的 9.6%. 我国是世界上苹果生产第一大国,2015 年的苹果种植面积 232.8 万 hm<sup>2</sup> 和产量 4 261 万 t,分别占世界苹果的<sup>[8]</sup>40.6%和 42.8%. 黄土高原地区因其降雨量少,昼夜温差大,光照时间长,土层深厚等特殊环境条件,已经成为我国苹果两大优势主产区之一,栽培面积 130 万 hm<sup>2</sup> 和鲜果产量 1 500 万 t·a<sup>-1</sup>,分别占全国苹果总栽培面积和总产量的 60% 和 55%<sup>[9]</sup>. 目前果园生态系统中应用涡度相关进行碳通量的研究相对较少,Rossi 等<sup>[10]</sup>在意大利的猕猴桃园和 Testi 等<sup>[11]</sup>在西班牙的油橄榄园中有相关报道,国内仅在葡萄园<sup>[12]</sup>和梨园<sup>[13]</sup>进行过这方面的研究. 一方面果树作为多年生作物,由于自身的特征,有助于将碳长期储存在土壤中或者短期储存在木质部;另一方面考虑到果树固定 C 的存储容量和种植面积的大小,中国果园生态系统在陆地生态系统的 C 周期中发挥了重要作用,并有助于碳汇<sup>[14]</sup>. 然而目前国内关于苹果园生态系统碳通量的研究较少,且主要集中在单叶水平<sup>[15,16]</sup>、果园土壤呼吸<sup>[17~20]</sup>等方面. 关于定量中国果园生态系统尺度下的碳汇强度信息较少,尤其是位于黄土高原地区的苹果园生态系统.

目前苹果园已经进行的碳通量研究,时间上存在连续性差、尺度小的缺点,针对以上现状,本研

究以陕西黄土高原地区集中连片的成龄苹果园生态系统为研究对象,利用涡度相关通量塔和配套气象观测系统对果园内碳通量和气象因素进行连续观测(2016-01~2016-12),开展苹果园下垫面与大气的碳交换研究,来定量分析苹果园碳通量和环境影响因素在不同时间尺度上变化规律,并对光合有效辐射 PAR 和不同层空气、土壤温度对 NEE 的影响进行探讨. 与此同时,与其它纬度相近的生态系统碳通量进行比较,通过找出黄土高原苹果园碳存储的有力证据,以期为准确估算我国黄土高原地区苹果园的碳汇强度提供数据支持,也对区域碳收支总量的估计以及陆地生态系统碳通量估测的完善都具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验果园位于苹果主产区陕西省咸阳市旬邑县太村镇(N35°08'52.845" E108°18'00.561"),如图 1 所示,试验开始于 2015 年 12 月. 该地地处黄土高原渭北旱塬,区域降水稀少且年际和年内分布不均,主要降水分布在 5~9 月,约占全年降水量的 80%,盛行风向为东南和西北方向,海拔 1 254 m. 属暖温带大陆性气候,温度适中,雨热同期. 当地光热资源丰富,年日照时数 2 390 h,无霜期 180 d,年平均气温 9.0℃, >10℃ 的积温 2 955℃,昼夜温差大. 地下水埋深达 70 m,多年平均降水量 589 mm,平均水面蒸发量 1 400 mm 左右. 容易出现当年冬季-次年春季的干旱. 土壤类型以黑垆土为主,耕层 0~20 cm 土壤颗粒组成为黏粒含量 23%,粉粒含量 47%,砂粒 30%,土壤有机质含量为 1.06%,总氮、磷和钾含量分别为 2.18、0.83 和 12.59 g·kg<sup>-1</sup>. 土壤 pH 为 8.3,干容重 1.24 g·cm<sup>-3</sup>,孔隙率 51%,田间持水量 28.73%,凋萎点 12.3%. 苹果树的主要物候期为萌芽(4 月中

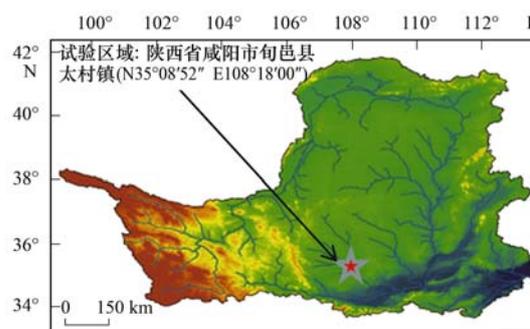


图 1 试验地点在黄土高原的位置

Fig. 1 Location of experimental area in the Loess Plateau

旬)、开花(4月下旬)、果实形成(5~9月)、果实成熟(10月)和叶片脱落(11月)。

涡度相关系统位于果园中部偏东,该地区苹果树平均高度 3.6 m, EC 系统观测高度位于冠层上方 1.1 m, 风浪区长度从 200~600 m 不等, 满足试验要求。试验区域的地形为典型的黄土高原塬面区, 地势平坦。安装仪器下方为集中连片的苹果园, 面

积 350 亩左右。当地在政府农业部门 2003 年统一规划下建园, 品种为长富二号。苹果行向为东西走向, 行距 5 m, 株距 3 m。树形采用疏散分层性, 中心领导干比较明显, 主枝 5~7 个, 分 2~3 层。试验地区果园的果树群体基本特征见表 1。该地区由于水资源限制在苹果生育期内不进行灌溉, 为典型的雨养农业区。

表 1 苹果园生态系统的果树基本特征表

Table 1 Basic features of apple trees in the apple orchard ecosystem

树龄/a	栽植密度/m	树形	干周/cm	干径/mm	树高/m	枝下高/cm	冠高/m	冠幅/m
14	5 m × 3 m	乔化	56.1	176.6	3.6	80.0	2.8	4.2

## 1.2 研究方法

在通量塔 4.7 m 处安装涡度相关观测系统, 型号为 Campbell 的 IRGASON 一体式通量探头, 核心部件为三维超声风速仪 (CSAT3A, Campbell Scientific Ltd., USA) 和 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外气体分析仪 (EC150, Campbell Scientific Ltd., USA), 分别测量风速和超声温度与 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 浓度。通量数据原始采样频率为 10 Hz, 利用数据采集器 (CR3000, Campbell Scientific Ltd., USA) 记录、在线计算和存储 30 min 的通量值和其它相关参数。

通量塔上同时配套安装了气象观测系统, 分别安装有二维风速仪 (Gill26, Gill Instruments Ltd., Lymington, England), 安装高度 8 m, SI-111 红外温度传感器 (SI-111, Campbell Sci., USA) 安装高度 4 m, 2 层空气温湿度传感器 (HMP155A, Vaisala, Helsinki, Finland), 安装高度分别为 4 和 8 m, 光合有效辐射传感器 (PQS1, Campbell Scientific Ltd., USA)、四分量净辐射表 (CNR4, Campbell Scientific Ltd., USA)、总辐射表 (CMP3, Campbell Scientific Ltd., USA), 翻斗式雨量筒 (TE525, Campbell Scientific Ltd., USA), 安装高度为 5 m; 土壤温度传感器 (109-L, Campbell Scientific Ltd., USA) 和土壤含水量传感器 (CS616, Campbell Scientific Ltd., USA) 分别有 4 层, 埋设的深度分别为 5、10、20 和 50 cm。二氧化碳探头 (GMP343, Campbell Scientific Ltd., USA) 安装高度 70 cm, 土壤热通量板 [HFPO1 (SC), Campbell Scientific Ltd., USA] 4 块, 分布在通量塔周围, 两块位于株间, 两块位于行间, 埋设深度为 5 cm, 所有传感器都连接在数据采集器 (CR3000, Campbell Scientific Ltd., USA) 和扩展板 AM25 上, 30 min 输出一组平均值。30 min 的气象数据和通量数据可以通过无线传输, 实现远程下载, 在通量塔周围安装远程监控, 用于观察果树物候期。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 CO<sub>2</sub> 通量

使用 Eddypro 6.2 软件 ([http://www.licor.com/env/products/eddy\\_covariance](http://www.licor.com/env/products/eddy_covariance)) 对 10 Hz 数据处理, 处理过程包括: ①对 10 Hz 原始数据进行野点剔除<sup>[21]</sup>、二次坐标轴旋转<sup>[22]</sup>和水汽密度校正<sup>[23]</sup>等; ②对计算出的碳通量数据依次进行储存通量修正<sup>[24]</sup>、异常峰值剔除<sup>[25]</sup>、摩擦风速校正和缺失数据插补等。碳通量通过计算垂直方向风速与 CO<sub>2</sub> 密度脉动值的协方差获得, 转化为 30 min 通量数据。

### 1.3.2 数据插补

在长期通量观测中, 由于仪器故障、系统校正及天气、风速等因素影响, 往往会造成观测数据丢失和异常, 为此, 还必须进行一系列的质量控制, 以保证观测数据的有效性。这主要包括: ①湍流不充分 (摩擦风速  $U^* < 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 利用周艳莲等<sup>[26]</sup>的方法确定  $U^*$  的临界值为  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ②剔除降雨同期数据; ③阈值控制; ④异常突出数据 (某一个数值与连续 5 点平均值之差的绝对值  $> 5$  个点方差的 2.5 倍)。使用非线性回归法进行数据拟合插补。具体方法为: 利用 Lloyd 等<sup>[27]</sup>的方程拟合夜间 (总辐射  $< 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 碳通量, 即  $R_{\text{eco.n}}$  与 5 cm 深度土壤温度 ( $T_s$ ) 的关系, 插补生长季 (4~11 月) 夜间和非生长季 (12 月~次年 3 月) 全天缺失的碳通量, 进而外推至白天。

$$R_{\text{eco.n}} = b_1 \exp(b_2 T_s) \quad (1)$$

式中,  $b_1$  和  $b_2$  是拟合系数,  $R_{\text{eco.n}}$  是夜间生态系统的呼吸, 数值上  $R_{\text{eco.n}}$  等于夜间生态系统 NEE 值  $NEE_n$  [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ],  $T_s$  为 5 cm 的土壤温度。生态系统呼吸的温度敏感性系数 ( $Q_{10}$ ) 使用以下公式计算:

$$Q_{10} = \exp(10b_2) \quad (2)$$

Michaelis-Menten 方程拟合日间 (总辐射  $\geq 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 碳通量即净生态系统碳交换量 (net ecosystem exchange, NEE) 与光合有效辐射 (photosynthetic active radiation, PAR) 的关系<sup>[28]</sup>.

$$F_C = \frac{F_{\max} \alpha \text{ PAR}}{\alpha \text{ PAR} + F_{\max}} + R_{\text{eco.d}} \quad (3)$$

式中,  $F_C$  为白天净生态系统碳交换量  $\text{NEE}_d$  [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ];  $\alpha$  为生态系统的表观量子效率 ( $\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ );  $F_{\max}$  为最大净生态系统  $\text{CO}_2$  交换 [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ];  $R_{\text{eco.d}}$  为生态系统的暗呼吸速率 [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ].

### 1.3.3 生态系统总生产力 (GPP) 和生态系统呼吸 ( $R_{\text{eco}}$ ) 计算

果园生态系统中, 生态系统总初级生产力 (GPP) 为生态系统呼吸 ( $R_{\text{eco}}$ ) (白天呼吸  $R_{\text{eday}}$  与夜间呼吸  $R_{\text{enight}}$  之和) 与净生态系统交换量 (NEE) 之差. 在碳生产力循环中, NEE 提供净生态系统截获和释放能力的信息, NEE 数值的正负表示生态系统光合和呼吸能力的强弱 (NEE  $< 0$  表示生态系统光合  $>$  呼吸, NEE  $> 0$  表示生态系统光合  $<$  呼吸). 涡度相关系统直接获取的是生态系统的 NEE, 果园生态系统的 GPP 和  $R_{\text{eco}}$  通过以下公式估算<sup>[28]</sup>:

$$\text{GPP} = R_{\text{eco}} - \text{NEE} \quad (4)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eday}} + R_{\text{enight}} \quad (5)$$

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据剔除, 计算平均值, Sigplot 12.5 软件制作相关的图件. 利用 SPSS 23 进行环境参数和 NEE 数据之间的拟合, 进行数据插补.

## 2 结果与分析

### 2.1 果园气象因子的年变化

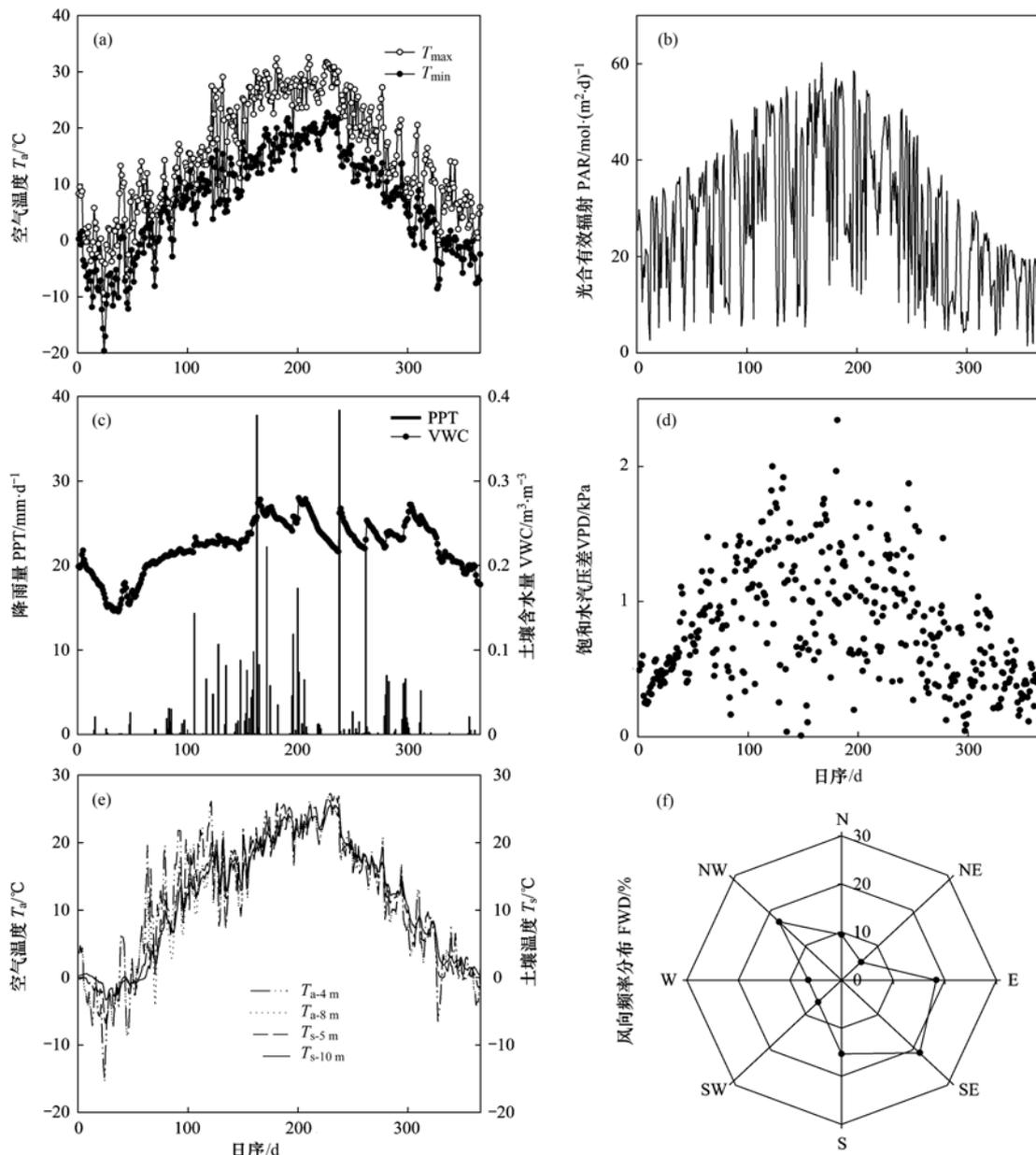
了解果园关键环境变量的季节变化, 对于研究果园与大气之间的碳交换至关重要. 图 2 显示了每日 4m 空气温度最大值 ( $T_{\max}$ ) 和最小值 ( $T_{\min}$ )、日总光合有效辐射 (PAR)、日总降雨量 (PPT)、日均土壤体积含水量 (VWC)、日均饱和水汽压差 (VPD)、日均 4 m、8 m 高空气温度 ( $T_a$ )、日均 5 cm、10 cm 土壤温度 ( $T_s$ ) 和风向频率 (FWD) 季节变化, 果园各气象要素的变化具有明显的季节特征.  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 $T_a$  和  $T_s$  具有相似的变化趋势, 呈抛物线变化, 具有明显的峰值,  $T_{\max}$  在 7 月末出现最大值,  $T_{\min}$ 、 $T_a$  和  $T_s$  最大值出现在 8 月中旬, 最小值都出现在 1 月末, 年平均值分别为 14.8、6.8、10.9 和

11.5 $^{\circ}\text{C}$ . 在整个研究期间,  $T_{s-5 \text{ cm}}$  和  $T_{s-10 \text{ cm}}$  变化比  $T_{a-4 \text{ m}}$  和  $T_{a-8 \text{ m}}$  更加平稳. 研究期间日总 PAR 最大值 [ $60.22 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ] 出现在 6 月 16 日, 月总 PAR 最高值出现在 7 月, 最低值出现在 12 月, 降雨和阴天对辐射的影响很大. 观测区的 2016 全年降雨量为 379.6 mm, 根据降水量年性划分标准<sup>[29]</sup>, 为枯水年. 5~9 月降雨量为 273.6 mm, 占全年降雨量的 72%, 6 月降雨量最高, 为 110.5 mm, 12 月降雨量最低, 为 3.4 mm. 降雨量随季节差异较为明显, 主要集中在夏季, 期间超过 30 mm 的两次降雨分别出现在 6 月 11 号 (37.8 mm) 和 8 月 25 号 (38.4 mm). 土壤含水量受降雨量和温度影响较为明显, 在 3~11 月保持在  $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  以上. 日总量 PAR 和日平均 VPD 变化趋势较为一致, 也表现出明显的季节变化, VPD 受降雨和辐射的影响非常明显. 日平均 VPD 在 6 月 29 日达到了峰值 2.34 kPa. 风向频率分布图显示, 在全年的风向中东南和西北风向占据 38% 左右, 其次是东风向 18%, 南风向 15% 左右, 北风向、东北风向、西风向和西南风向小于 10%. 主风向为西北和东南风向.

### 2.2 苹果园生态系统的 $\text{CO}_2$ 交换特征

#### 2.2.1 苹果园各月净生态系统碳通量日变化

利用苹果园连续观测的通量数据, 以半小时为间隔, 分别计算每个月同一时刻 NEE 的月平均值, 得到苹果园生态系统 1 a 中不同月份 NEE 的月平均日变化图 3, 每个月的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换 (NEE) 平均日变化基本呈单峰曲线变化. 其中生长季期间 (4~11 月) 呈 U 形曲线变化趋势, 夜间大部分为正值, 白天为负值, 在非生长季 (12 月~次年 3 月), 生态系统的呼吸受到限制, NEE 基本表现为正值,  $\text{CO}_2$  通量的变化幅度小. NEE 负值越小表示果园生态系统吸收的  $\text{CO}_2$  量越大, 正值越大表示生态系统排放的  $\text{CO}_2$  量越大. 生长季期间 (4~11 月) 5、6、7 和 8 月 NEE 的日变化通量峰值都很接近, 分别为 -15.48、-15.73、-16.99 和 -17.08  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 最大  $\text{CO}_2$  吸收峰值出现在 12:00 左右, 最大的  $\text{CO}_2$  排放峰值出现在夜间 20:00~21:00 左右, 分别为 2.75、2.79、4.08 和 3.84  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ . 8 月出现  $\text{CO}_2$  的最大的吸收值, 但最大的  $\text{CO}_2$  排放值出现在 7 月. 非生长季 (12 月~次年 2 月), NEE 值接近于 0, 变化范围为 0.30~0.68  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 3 月的变化范围为 0.48~1.48  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 整体上变化不明显, 其中 3 月的呼吸强度高于非生长季其它月份.



(a) 每日 4 m 空气最大温度 ( $T_{\max}$ ) 和最小温度 ( $T_{\min}$ ); (b) 日总光合有效辐射 (PAR); (c) 日总降雨量 (PPT) 和日 5, 10, 20 和 50 cm 平均土壤含水量 (VWC); (d) 日均饱和水汽压差 (VPD); (e) 日均 4 m 和 8 m 空气温度 ( $T_{a-4m}$  和  $T_{a-8m}$ ) 与 5 cm 和 10 cm 土壤温度 ( $T_{s-5cm}$  和  $T_{s-10cm}$ ); (f) 风向频率分布 (FWD)

图 2 研究期间苹果园主要气象因子的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of major meteorological factor and apple orchard variables over the course of the study

### 2.2.2 GPP、 $R_{\text{eco}}$ 和 NEE 日总量和月总量的季节变化

通量数据处理后计算 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 的日总量和月总量。本研究中 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 日总量和月总量的季节性变化如图 4。苹果园在 DOY101 (日序, 下同) 前后开始吸收碳, 在 DOY325 前后停止吸收碳。DOY101 ~ 136 期间 GPP 呈线性增加, NEE 值呈线性下降, 相比而言  $R_{\text{eco}}$  的变化弱于 GPP 和 NEE, 使得生态系统迅速变成强烈的碳汇, 且 GPP 明显高于  $R_{\text{eco}}$ 。日最大 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 分别为

11.12、5.04 和  $-7.34 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。GPP 和 NEE 在 DOY136 ~ 244 期间保持相对稳定, 之后开始缓慢下降, 到 DOY325, 二者的值接近于 0, 与月值变化趋势相一致, 而  $R_{\text{eco}}$  日值的季节变化波动较大。冬季和早春, 在 DOY1 ~ 101 和 325 ~ 366 的期间即叶片脱落后至树木萌芽前, NEE 和  $R_{\text{eco}}$  速率很小, 果园通过土壤呼吸不断损失碳, 日 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 的值受降雨的波动较大, 如 7 月有降雨的天数为 11 d, 降雨日 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 的平均值分别为

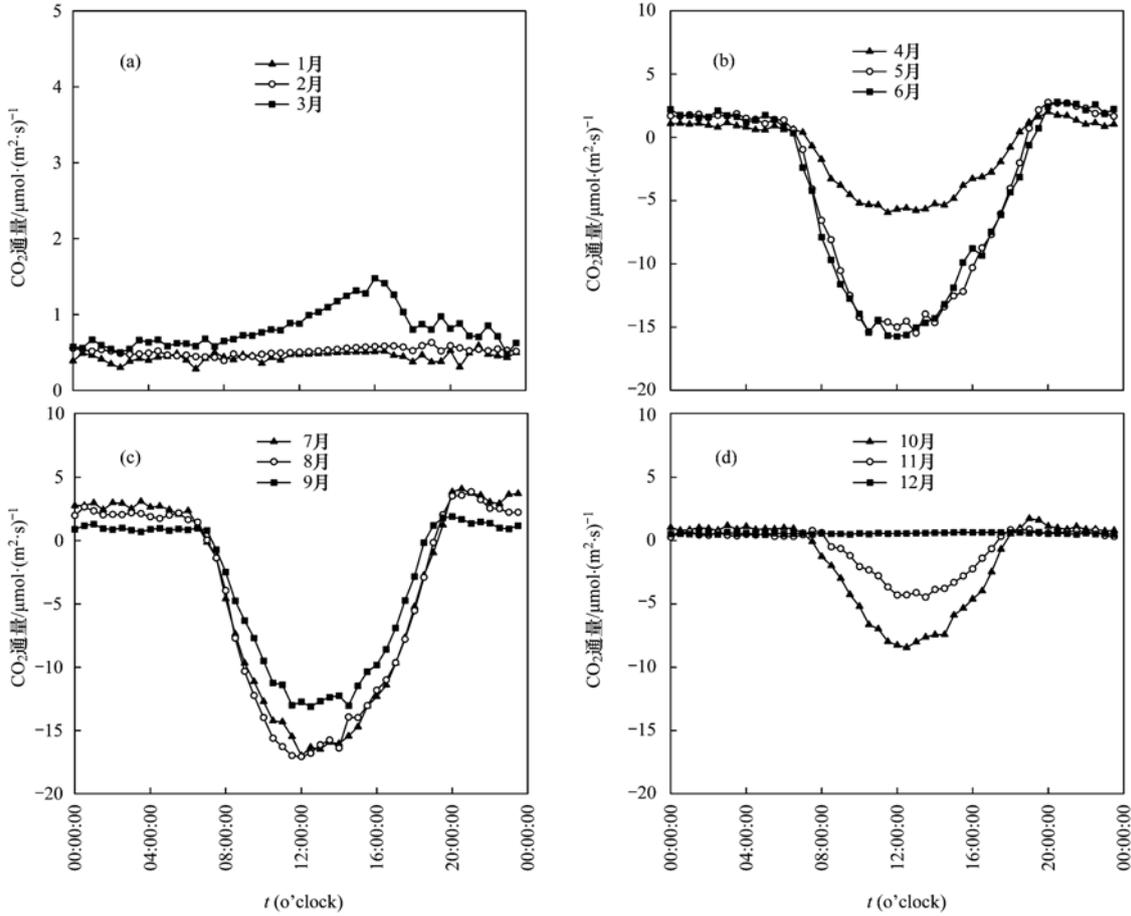


图3 苹果园 NEE 的月平均日变化

Fig. 3 Diurnal variation of apple orchard monthly mean NEE

6.14、2.75 和  $-3.39 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，晴天日 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 的平均值分别为 8.45、3.76 和  $-4.68 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。月 GPP 和 NEE 总量的变化和日总量的季节变化趋势相似，在生长季初期 4~5 月迅速增加，5~8 月保持相对稳定，8~11 月缓慢下降。月 GPP 和  $R_{\text{eco}}$  值最大值都出现 7 月分别为  $238.97 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{月})^{-1}$  和  $105.38 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{月})^{-1}$ ，而 NEE 的最

大值出现在 8 月为  $-144.44 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{月})^{-1}$ 。5、6、7 和 8 月 GPP 和 NEE 月累积值非常接近。相比之下，月  $R_{\text{eco}}$  总量的变化先缓慢增加，7 月出现最大值，后缓慢下降。在非生长季，NEE 为正值且接近于  $R_{\text{eco}}$ ，变化波动不大，GPP 的值接近于 0。NEE 和  $R_{\text{eco}}$  月总量的最大值出现在 3 月为  $20.39 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{月})^{-1}$ 。黄土高原成龄苹果园生态系统 NEE 月总量除非生

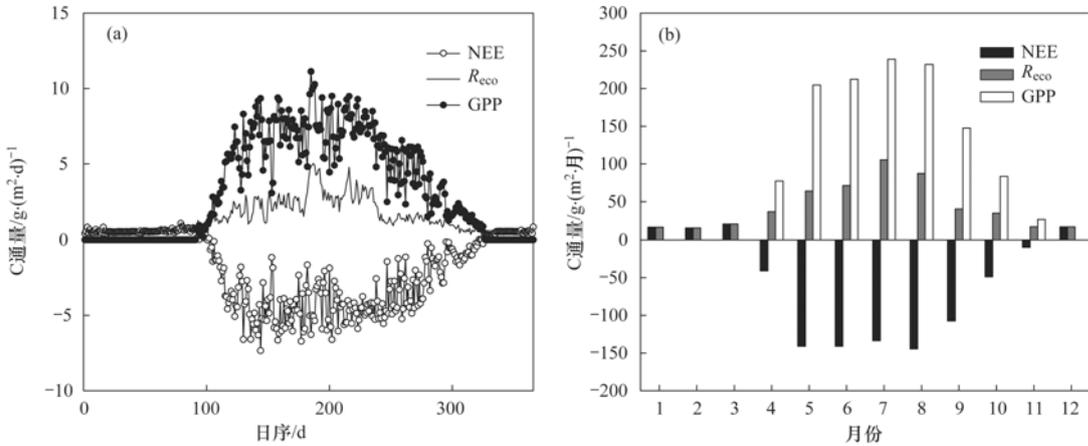


图4 苹果园 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和 NEE 的日总量和月总量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of daily and monthly total GPP,  $R_{\text{eco}}$  and NEE of the apple orchard

长季 12、1、2 和 3 月为正值外(表现为碳源), 生长季(4~11 月)都为负值(表现为碳汇).

2.2.3 NEE、GPP 和 R<sub>eco</sub> 日累积的季节变化

通过把日 NEE、GPP 和 R<sub>eco</sub> 总量累加得到图 5 中苹果园累积 GPP、R<sub>eco</sub> 和 NEE 的季节变化. 果园生态系统的 GPP、R<sub>eco</sub> 和 NEE 年累积总量分别为 1223.2、525.2 和 -698.0 g·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>. 累积 GPP 和 NEE 在萌芽前和落叶后的增长速率很慢, 同期与二者相比 R<sub>eco</sub> 的增长略微明显. 在果树萌芽后, GPP 和 NEE 的增长速率很快, 曲线的斜率接近于 1, 在 9 月增长速度开始减小, 而 R<sub>eco</sub> 增长速率则要缓慢很多. 累积 NEE、GPP 和 R<sub>eco</sub> 的变化趋势与 NEE、GPP 和 R<sub>eco</sub> 日和月总量的变化趋势相一致.

2.3 光合有效辐射对白天碳通量的影响

光是光合作用的驱动者, 光合有效辐射是影响光合作用的主要因子之一. 选取生长期不同季节(春、夏和秋季)多个典型阴天和晴天半小时 PAR 和 NEE 数据作图, 探讨阴天和晴天对 NEE 的影响. 图 6(a)~6(c) 显示苹果园 NEE 在不同季节阴天和晴天的日变化, 苹果园 NEE 值在晴天和阴天的变化曲线都为 U 形曲线. 晴天变化相对剧烈, 最大 NEE 值出现在 11:30~12:00, 分别为 -19.89、-21.31 和 -17.39 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>. 阴天 NEE 变化相对平稳, 最大 NEE 出现在 11:00~13:00, 分别为 -13.82、-16.68 和 -10.64 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>. 图 6(d)~6(f)

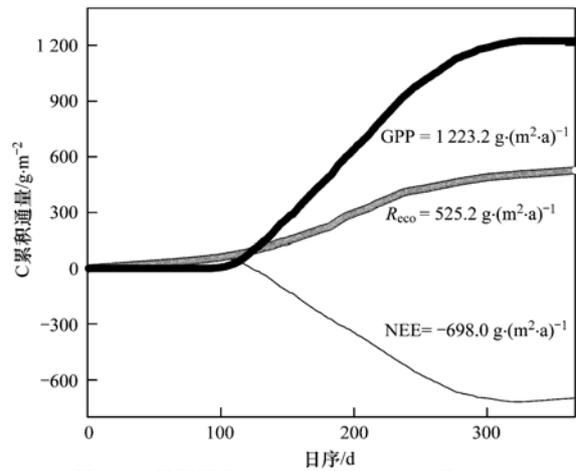


图 5 苹果园累积 GPP、R<sub>eco</sub> 和 NEE 的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of cumulative GPP, R<sub>eco</sub>, and NEE of the apple orchard

显示苹果园在阴天和晴天 PAR 日变化. PAR 变化趋势阴天为 U 形, 晴天为 V 形, 昼间由于乌云遮挡, 阴天 PAR 值显著低于晴天, 晴天的峰值分别为 1 897.3、1 936.9 和 1 539.9 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 出现的时间为 13:00~13:30, 阴天的峰值分别为 456.8、1 214.5 和 655.4 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 出现的时间分别为 11:00~13:00. 在不同季节晴天和阴天的日变化中, 晴天最大 NEE 值和 PAR 的峰值出现时间并不一致, 而阴天则对应一致, 表明苹果树在晴天最大辐射值时出现微弱的光合午休. 不同季节晴天的 NEE 和 PAR 值显著大于阴天, 其中夏季晴天与阴天的 NEE

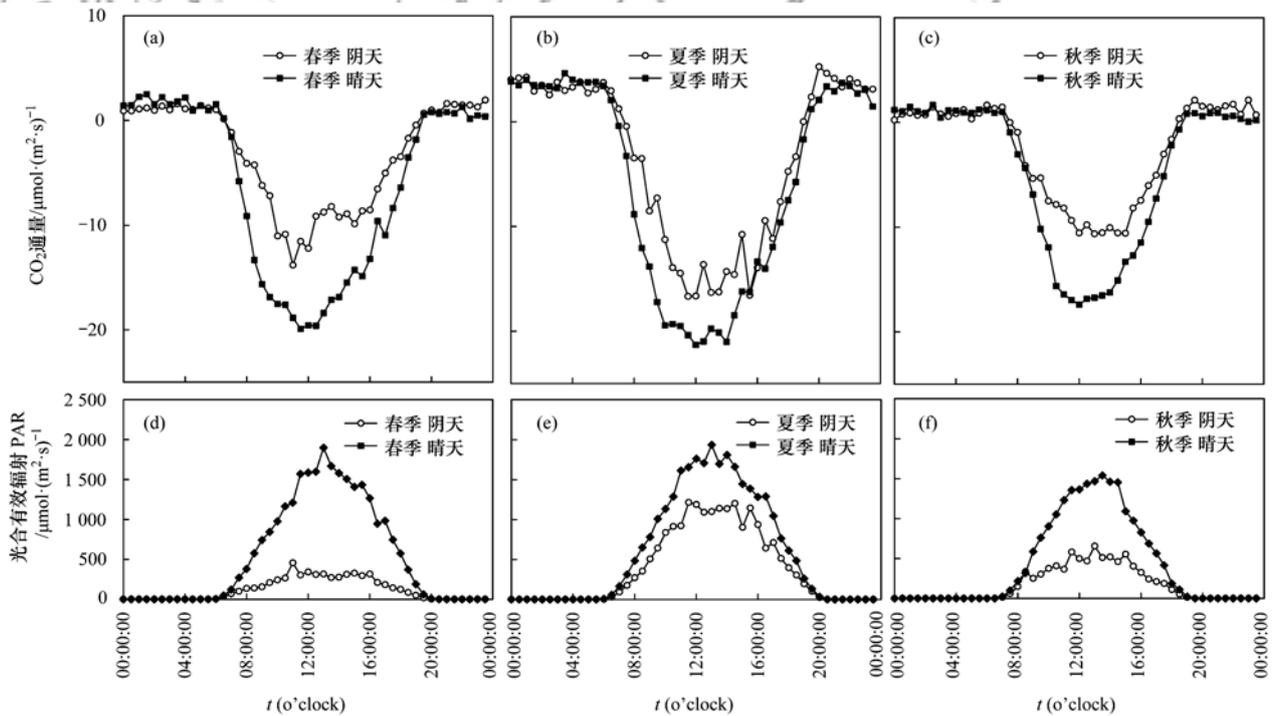


图 6 苹果园 PAR 和 NEE 在不同时期晴天和阴天的日变化

Fig. 6 Diurnal variation in the sunny and cloudy days in the apple orchard PAR and NEE for different periods

和 PAR 差异最小。

苹果园的结构和功能在一年中发生明显的变化，

因此选择生长季(4~11月)以月为单位研究白天 NEE 如何响应 PAR 的变化，如图 7 所示。基于方程

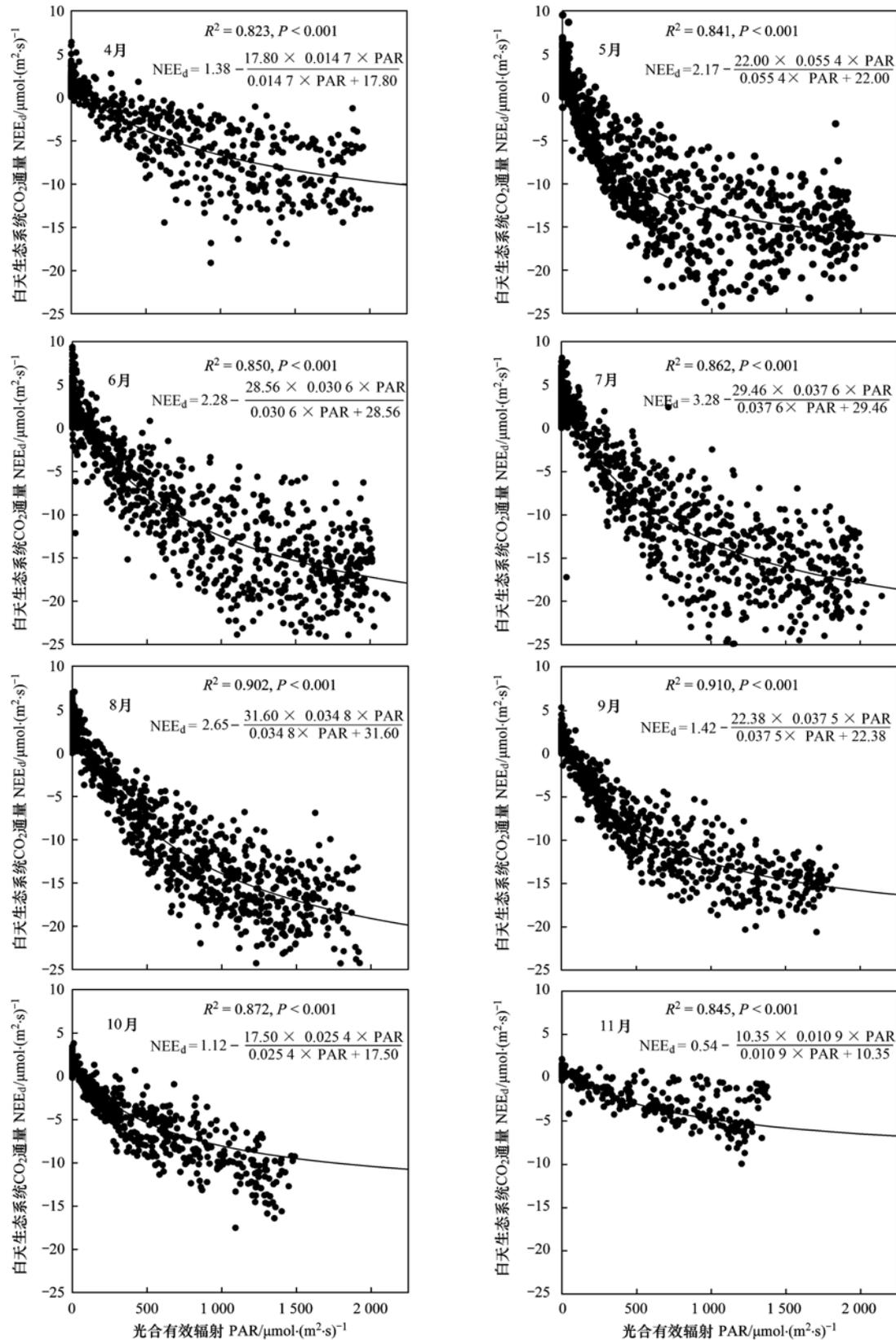


图 7 苹果园生长季(4~11月)白天生态系统净碳交换( $NEE_d$ )对光合有效辐射(PAR)的响应

Fig. 7 Light-response curves of daily net system exchange( $NEE_d$ ) to photosynthetic active radiation(PAR) of the apple orchard growing season(Apr. -Nov. )

(3)的回归分析表明, PAR 变化引起 NEE<sub>d</sub> 变化的相关性超过 80%, 说明在生长季白天净碳吸收量主要受光合作用的影响, 而光合有效辐射直接影响光合作用效率. 拟合生态系统表观量子效率(α)的变化范围为 0.010 9 ~ 0.055 4 μmol·μmol<sup>-1</sup>, 量子产量完全在阔叶森林的公开数据<sup>[30]</sup>范围之内. 拟合最大净生态系统交换 F<sub>max</sub> 和生态系统的暗呼吸速率 R<sub>eco,d</sub> 的变化范围分别为 -10.35 ~ -31.60 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup> 和 0.54 ~ 3.28 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>, 最大值分别出现在 8 月和 7 月, 最小值都出现在 11 月. 拟合参数 F<sub>max</sub> 和 R<sub>eco,d</sub> 数值的变化趋势与月 NEE 和 R<sub>eco</sub> 的变化趋势相似, 最大值出现的时间和月变化一致.

2.4 不同层土壤、空气温度对夜间碳通量的影响  
温度对 CO<sub>2</sub> 交换的影响, 主要通过影响 R<sub>eco</sub> 发

挥作用, 分为温度对根系及微生物活性的直接影响和温度对光合作用及碳素分布的间接影响, 继而进一步影响生态系统的净碳交换<sup>[31]</sup>. 夜间净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量 NEE 数值上等于 R<sub>eco,n</sub>, 基于全年的数据, 选取 U > 0.15 m·s<sup>-1</sup> 数据质量好的夜间 NEE 数据和相对应的气象数据, 利用指数方程 (1) 对 R<sub>eco</sub> 和 5 cm、10 cm 土壤温度以及在 4 m 和 8 m 高空气温度的关系进行拟合比较. 图 8 生态系统呼吸和不同温度之间关系的结果表明, 0.5 h 尺度的全年夜间果园生态系统呼吸与不同层土壤、空气温度之间主要呈现正相关指数关系, 相关系数表现为 T<sub>s-5 cm</sub> > T<sub>s-10 cm</sub> > T<sub>a-4 m</sub> > T<sub>a-8 m</sub>, 苹果树各物候期夜间生态系统呼吸与土壤温度的相关性较高, 其中土壤呼吸对 5 cm 土壤温度的敏感系数 Q<sub>10</sub> = 2.365.

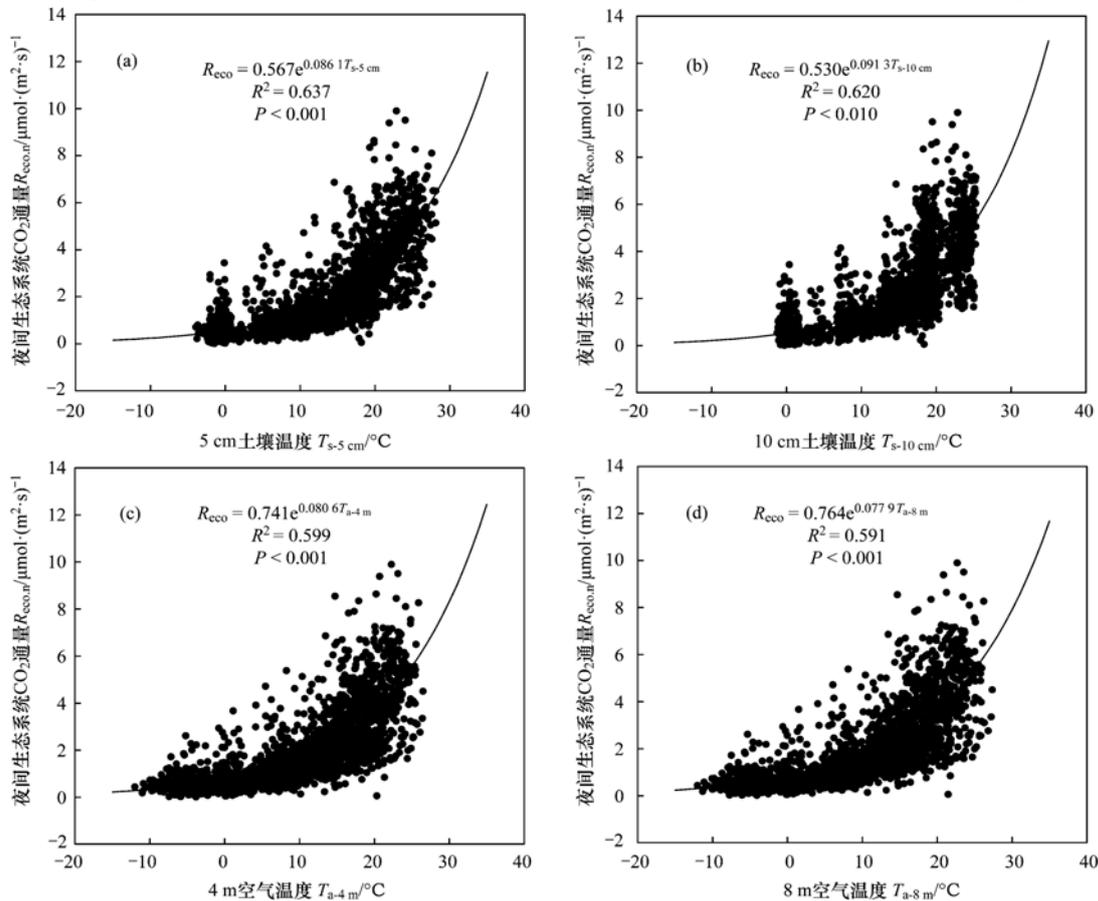


图 8 苹果园夜间生态系统呼吸 ( $R_{eco,n}$ ) 和不同层土壤、空气温度之间的关系

Fig. 8 Relationship between apple orchard nighttime ecosystem respiration ( $R_{eco,n}$ ) and different layers of soil and air temperature

3 讨论

3.1 苹果园生态系统碳通量在不同时间尺度的变化规律

果园是农田生态系统的重要类型之一, 对完整陆地碳循环具有重要意义. 本文以中国四大苹果主

产区之一的黄土高原地区成龄苹果园为研究对象, 利用涡度相关系统, 基于全年 (2016-01 ~ 2016-12) 的通量观测数据和气象数据, 分析了黄土高原地区苹果园的碳通量特征在不同时间尺度上的变化特征以及主要气象因子对生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换的影响. 生长季 (4 ~ 11 月) 内 NEE 白天为负值, 夜间为正

值, 随温度升高, 辐射增强, 苹果树萌芽, 树冠叶幕逐渐形成, 苹果园生态系统碳汇能力迅速增加、持续时间逐渐延长, 光合和呼吸强度逐渐增加, 7月达到呼吸峰值, 8月达到净  $\text{CO}_2$  吸收峰值, 之后随着温度下降, 辐射减弱, 叶片老化, 苹果树的光合和呼吸能力逐渐下降, 10月下旬苹果树叶片开始脱落, 到11月上旬净  $\text{CO}_2$  吸收和排放降到最低值, 11月中旬左右叶片完全脱落. 虽然日光合有效辐射在7月达到最大, 但由于7月出现连续的降雨和阴天, 影响了辐射, 进而影响了净  $\text{CO}_2$  吸收. 在非生长季(12月~次年3月), 由于树上没有叶片不进行光合作用, 生态系统只进行  $\text{CO}_2$  排放, 温度降低进一步限制了土壤呼吸, 由于12月末至2月末土壤表层上冻, 土壤含水量低, 土壤呼吸进一步受到限制, 碳排放量很低, 此时 NEE 值接近于零. 3月温度升高, 地表温度  $>0^\circ\text{C}$ , 土壤解冻, 苹果树的根系开始活动, 使得整个生态系统呼吸增强, 呼吸强度明显高于非生长季其它月份. 在苹果树生长季内(4~11月), 净碳交换的日总量只有一个峰值  $[-7.34 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}]$ , 与 Guo 等<sup>[12]</sup>研究的葡萄园和 Zhang 等<sup>[13]</sup>研究的梨园结果相一致, 而与 Shen 等<sup>[32]</sup>对华北平原冬小麦-夏玉米生态系统具有两个峰值不同. 不同的碳交换特征可能是苹果树作为多年生果树与其他作物之间的物候期差异引起的. 在没有高温、缺水和养分不足胁迫的条件下 GPP 数值的季节变化依赖于叶片截获 PAR 的数量<sup>[33]</sup>, 在本研究中, 最大的  $\text{CO}_2$  吸收出现在5~8月, 这个时期的光合作用约占全年光合作用的70%左右. 在5~8月期间, 苹果树冠层叶幕几乎全部出现, 叶片的光合能力达到最强, PAR 达到全年中的较高水平, 空气日平均温度  $15.6\sim 25.2^\circ\text{C}$ , 土壤的平均含水量  $0.25 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , 降雨量  $243.6 \text{ mm}$ . 7月  $R_{\text{eco}}$  出

现最大值, 在光合作用和呼吸作用的共同作用下, GPP 也在此时达到最大值.

### 3.2 苹果园生态系统碳通量与其它生态系统的比较

苹果园生态系统 GPP、NEE 和  $R_{\text{eco}}$  年累积量分别为  $1223.2$ 、 $-698.0$  和  $525.2 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 表明黄土高原成龄苹果园具有较高的固碳能力, 为强烈的碳汇, 这与 Wu 等<sup>[14]</sup>对我国东、西、中部地区不同龄期苹果园碳汇潜力的调查结果一致, 即成龄苹果园具有较高的碳汇潜力. 如表2所示, 与人工林<sup>[34]</sup>相比, 苹果园生态系统具有较高固碳潜力的原因是研究对象为果园生态系统, 人为进行的修剪、施肥和除草等各种管理措施, 都使得苹果树向积累更多的碳、产生更大的经济效益方向生长. 与纬度相近的其它果园生态系统相比较, 苹果园生态系统每年 NEE 值(绝对值)低于西北旱区武威酿酒葡萄园<sup>[12]</sup>, 在单叶水平葡萄和苹果的光合能力差异并不明显, 如孙文泰等<sup>[15]</sup>测定长富二号苹果单叶光合为  $16.93 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , 刘玉兰等<sup>[35]</sup>测定酿酒葡萄苹果单叶光合为  $15 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 左右, 产生差异的原因可能与两个试验地区不同 PAR 值和日照时数有关, 本试验地区年日照时数  $2390 \text{ h}$ , 武威地区日照时数  $3000 \text{ h}$ 以上; 而略高于林型相近的梨园<sup>[13]</sup>, 但是低于地中海气候下种植的常绿树橄榄树<sup>[5]</sup>, 造成的原因可能是梨园每年约6个月显示负的 NEE 值, 而苹果园在8个月显示负的 NEE 值, 橄榄种植园长的碳吸收期, 全年12个月表现为碳汇. 与纬度相近的一年生农田生态系统<sup>[36]</sup>相比, 苹果园 NEE 值(绝对值)显著大于该生态系统, 显示了苹果园更强的碳汇能力. 苹果树强的碳汇特性可能和它的光合特性和物候期有关. 苹果适宜种植在光照时间长, 辐射强和昼夜温差大的

表2 不同生态系统 NEE 比较

Table 2 Comparison of net  $\text{CO}_2$  exchange for different ecosystems

年份	站名	纬度	经度	海拔 /m	气候类型	生态系统类型	年净碳交换量 / $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	文献
2016	黄土高原旬邑	35°08'N	108°18'E	1254	温带大陆性季风气候	苹果园	-698.0	本研究
2008	西北旱区武威	37°51'N	102°51'E	1585	温带大陆性气候	葡萄园	-820.0	[12]
2009	西北旱区武威	37°51'N	102°51'E	1585	温带大陆性气候	葡萄园	-840.0	[12]
2010	西北旱区武威	37°51'N	102°51'E	1585	温带大陆性气候	葡萄园	-961.0	[12]
2002~2003	华北平原禹城	36°57'N	116°38'E	23	暖温带大陆季风气候	冬小麦	-77.6	[36]
2002~2003	华北平原禹城	36°57'N	116°38'E	23	暖温带大陆季风气候	夏玉米	-120.1	[36]
2003~2004	华北平原禹城	36°57'N	116°38'E	23	暖温带大陆季风气候	冬小麦	-152.2	[36]
2003~2004	华北平原禹城	36°57'N	116°38'E	23	暖温带大陆季风气候	夏玉米	-165.6	[36]
2011~2012	华北平原赵县	37°47'N	114°55'E	40	暖温带亚湿润气候	梨园	-600.0	[13]
2011~2012	华北平原延庆县	40°22'N	115°56'E	535	大陆性季风气候	人工林	-256.0	[34]
2006~2008	意大利 Castelvetrano	37°38'N	12°50'E	93	亚热带地中海气候	橄榄园	-1350.0 ~ -1160.0	[5]

地方,夜间的低温环境会抑制呼吸,使得夜间的正的 NEE 值更小。

### 3.3 光合有效辐射和不同温度对苹果园生态系统碳通量的影响

苹果园 NEE 在不同季节晴天和阴天的日变化中,当晴天光合有效辐射达到最大值时观察到不明显的光合午休现象,没有出现明显双峰型曲线,这与孙文泰等<sup>[15]</sup>在陇东旱地果园中苹果光合的研究结果相似,与 Guo 等<sup>[12]</sup>研究武威西北旱区的葡萄园和孙霞等<sup>[16]</sup>在新疆地区苹果园中观察到明显的光合午休现象的结果即双峰型曲线不一致,这可能与两个地区生长季日间最高温度和辐射强弱有关。苹果园生态系统白天 CO<sub>2</sub> 通量对 PAR 的响应结果表明,直角双曲线方程能很好地用来描述果园生态系统 PAR 和白天净 CO<sub>2</sub> 的交换的关系,二者之间的相关系数达到 0.8 以上。同时也说明,在生长季辐射强弱是影响果园生态系统白天净 CO<sub>2</sub> 交换最主要的因素,这一点和净碳交换在晴天和阴天的日变化中也可以看出。与唐祥等<sup>[34]</sup>研究人工林和朱咏莉等<sup>[37]</sup>研究稻田的结果相一致。本研究分析了夜间生态系统呼吸与不同层次土壤、空气温度的响应,相关系数的大小表现为  $T_{s-5\text{ cm}} > T_{s-10\text{ cm}} > T_{a-4\text{ m}} > T_{a-8\text{ m}}$ ,其中  $R_{\text{eco},n}$  与 5 cm 土壤温度的相关性最好,这与牛晓栋等<sup>[38]</sup>的研究报导结果相一致。苹果园生态系统年  $Q_{10} = 2.365$  趋向于生态系统<sup>[39]</sup>  $Q_{10}$  平均幅度范围(1.3 ~ 5.6)的中间值。

## 4 结论

(1)黄土高原成龄苹果园生态系统 NEE 的日变化基本呈现单峰曲线变化,生长季内 12:00 左右出现通量峰值,日变化具有很大的季节差异。月总量在生长季(4 ~ 11 月)为碳汇,呈“U”形变化趋势,NEE 月总量的大小依次为 8 月 > 6 月 > 5 月 > 7 月 > 9 月 > 10 月 > 4 月 > 11 月,  $R_{\text{eco}}$  月总量的大小依次为 7 月 > 8 月 > 6 月 > 5 月 > 9 月 > 10 月 > 4 月 > 11 月。非生长季(12 月 ~ 次年 3 月)表现为碳源,碳源能力较弱,  $R_{\text{eco}}$  月总量的大小依次为 3 月 > 12 月 > 1 月 > 2 月。

(2)苹果园生态系统的碳通量在生长季变化幅度大,非生长季变化不明显,全年表现为“一峰两谷”的变化趋势。直角双曲线方程能对苹果园生态系统生长季白天净碳通量与光合有效辐射的响应进行很好描述,二者之间的相关性达到 80% 以上。生态系统呼吸速率随不同层次空气、土壤温度的升高

呈正指数增加,其中 5cm 土壤温度与苹果园生态系统呼吸之间的相关性最高,  $Q_{10}$  值为 2.365。

(3)苹果园的年净生态系统碳交换为  $-698.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,与纬度相近的其它生态系统相比,苹果园生态系统具有较高的固碳能力和生态价值。

致谢:感谢国家苹果产业技术体系咸阳综合试验站查养良站长和旬邑县园艺站辛选民站长在仪器安装过程中的帮助。

### 参考文献:

- [1] Alexander L, Allen S, Bindoff N L, *et al.* Summary for policymakers [A]. In: IPCC (Ed.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013. 710-719.
- [2] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环 [M]. 北京:气象出版社, 2002. 35-48.
- [3] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 479-492.
- [4] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 169-172.
- [5] Nardino M, Pernice F, Rossi T, *et al.* Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard [J]. *Photosynthetica*, 2013, **51**(1): 63-74.
- [6] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展 [J]. *地理科学*, 2003, **23**(5): 622-628.  
Song C C. Advance in research on carbon cycling in wetlands [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(5): 622-628.
- [7] 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.  
Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(3): 719-733.
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/gwzw.htm>, 2016-01-19.
- [9] 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.
- [10] Rossi F, Facini O, Georgiadis T, *et al.* Seasonal CO<sub>2</sub> fluxes and energy balance in a kiwifruit orchard [J]. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2007, **1**: 44-56.
- [11] Testi L, Orgaz F, Villalobos F. Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **63**(1-3): 168-177.
- [12] Guo W H, Kang S Z, Li F S, *et al.* Variation of NEE and its affecting factors in a vineyard of arid region of northwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **84**: 349-354.
- [13] Zhang Y C, Shen Y J, Xu X L, *et al.* Characteristics of the water-energy-carbon fluxes of irrigated pear (*Pyrus bretschneideri*

- Rehd) orchards in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **128**: 140-148.
- [14] Wu T, Wang Y, Yu C J, *et al.* Carbon sequestration by fruit trees-Chinese apple orchards as an example[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(6): e38883.
- [15] 孙文泰, 赵明新, 尹晓宁, 等. 陇东旱地果园地表覆盖方式对苹果光合特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, **31**(3): 19-25, 60.
- Sun W T, Zhao M X, Yin X N, *et al.* Effects of different mulch modes on apple photosynthesis in dry-land orchards of east Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, **31**(3): 19-25, 60.
- [16] 孙霞, 柴仲平, 蒋平安. ‘红富士’苹果光合特性日变化特征研究[J]. *北方果树*, 2010, (5): 4-6.
- Sun X, Chai Z P, Jiang P A. Study the diurnal variation of photosynthetic characteristics on ‘Red Fuji’ apples [J]. *Northern Fruits*, 2010, (5): 4-6.
- [17] 贾曼莉, 郭宏, 杜毅飞, 等. 生草对渭北黄土高原苹果园土壤呼吸的影响[J]. *草地学报*, 2014, **22**(3): 518-527.
- Jia M L, Guo H, Du Y F, *et al.* Influences of interplanting herbage on the soil respiration of apple orchard in Weibei Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, **22**(3): 518-527.
- [18] 李泽. 渭北旱塬苹果园土壤呼吸的时空变异特征及其影响因素[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012. 31-34.
- Li Z. Spatio-temporal character of soil respiration and its influence factors in apple orchard of Weibei dryland [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. 31-34.
- [19] 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 等. 苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1915-1921.
- Wang R, Guo S L, Liu Q F, *et al.* Variation characteristic in soil respiration of apple orchard and its biotic and abiotic influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1915-1921.
- [20] 张红星. 黄土高原小麦田和苹果园生态系统土壤呼吸研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009. 28-55.
- [21] Vickers D, Mahrt L, Blodgett P. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, **14**(3): 514-526.
- [22] Nakai M, Kashiwazaki N, Takizawa A, *et al.* Morphologic changes in boar sperm nuclei with reduced disulfide bonds in electrostimulated porcine oocytes[J]. *Reproduction*, 2006, **131**(3): 603-611.
- [23] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, **106**(447): 85-100.
- [24] Zha T S, Kellomäki S, Wang K Y, *et al.* Carbon sequestration and ecosystem respiration for 4 years in a scots pine forest[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(9): 1492-1503.
- [25] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, *et al.* Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation [J]. *Biogeosciences*, 2006, **3**(4): 571-583.
- [26] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种不同下垫面地表粗糙度动态变化及其对通量机理模型模拟的影响[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, **36**(增刊1): 244-254.
- [27] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, **8**(3): 315-323.
- [28] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 255-260.
- [29] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(6): 1234-1240.
- Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z, *et al.* Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(6): 1234-1240.
- [30] Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, *et al.* CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: a review[J]. *Advances in Ecological Research*, 1995, **26**: 1-68.
- [31] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [32] Shen Y J, Zhang Y C, Bridget R, *et al.* Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **181**: 133-142.
- [33] Auzmendi I, Marsal J, Girona J, *et al.* Daily photosynthetic radiation use efficiency for apple and pear leaves: seasonal changes and estimation of canopy net carbon exchange rate [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, **51**: 1-8.
- [34] 唐祥, 陈文婧, 李春义, 等. 北京八达岭林场人工林净碳交换及其环境影响因子[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(11): 3057-3064.
- Tang X, Chen W J, Li C Y, *et al.* Net carbon exchange and its environmental affecting factors in a forest plantation in Badaling, Beijing of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(11): 3057-3064.
- [35] 刘玉兰, 郑有飞, 张晓煜, 等. 光质和光强对酿酒葡萄光合速率及糖分积累的影响[J]. *中国农业气象*, 2006, **27**(4): 286-288, 292.
- Liu Y L, Zheng Y F, Zhang X Y, *et al.* A study on impacts of light conditions on net photosynthesis and sugar accumulation of wine grape[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, **27**(4): 286-288, 292.
- [36] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 544-546.
- [37] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 稻田 CO<sub>2</sub> 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1040-1044.
- Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, *et al.* Responses of CO<sub>2</sub> fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1040-1044.
- [38] 牛晓栋, 江洪, 张金梦, 等. 浙江天目山老龄森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量特征[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(1): 1-8.
- Niu X D, Jiang H, Zhang J M, *et al.* Characteristics of CO<sub>2</sub> flux in an old growth mixed forest in Tianmu Mountain, Zhejiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(1): 1-8.
- [39] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q<sub>10</sub> [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(2): 223-230.

## CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM <sub>2.5</sub> ) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM <sub>2.5</sub> in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM <sub>2.5</sub> in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N <sub>2</sub> O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO <sub>2</sub> Flux in a Mature Apple ( <i>Malus domestica</i> ) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues ( <i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM <sub>2.5</sub> Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)