

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄朝峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪镡, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响

李洪建, 杨艳, 严俊霞*

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 用箱式法在太原盆地对冬小麦的碳通量进行了两年的测定, 对比分析了气温(T_a)、土壤温度(T_s)和冠层辐射温度(T_c)的日、季节变化与冬小麦碳通量日、季节变化的关系. 结果表明, 在日、季节尺度上 T_c 与 T_a 具有较好的一致性, 相关系数在 0.90 以上; 日尺度上, 净生态系统碳交换量(NEE)、总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R_{eco})与 T_s 的相关系数在绝大部分测定日都小于与 T_a 和 T_c 的相关系数, 但它们与 T_a 和 T_c 的相关系数差异不大; 季节尺度上, 冬小麦的 GPP、NEE 和 R_{eco} 与 3 个温度(T_a 、 T_s 和 T_c)都呈显著的二次抛物线关系. 生态系统光合作用的最适温度 T_c 略低于 T_a 的, 差异约 1°C 左右. R_{eco} 与 T_a 的关系均好于与 T_s 的关系, 与 T_c 、 T_a 关系的决定系数差异不大(0.95 ~ 0.96). 研究结果可以为基于遥感方式观测的冠层辐射温度在估算碳通量中的应用提供依据.

关键词: 冬小麦; 碳通量; 冠层辐射温度; 气温; 土壤温度

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3650-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.049

Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin

LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia*

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We measured daily changes of carbon dioxide exchange in a winter wheat site in Taiyuan basin using chamber method for two years and analyzed relationships between environmental factors affecting carbon exchange of the wheat, including air temperature (T_a), soil temperature (T_s), canopy radiation temperature (T_c) and carbon exchange of the wheat on daily and seasonal scales. The results showed that variations of both T_c and T_a on daily and seasonal scales were consistent with a correlation coefficient of above 0.90. On daily scale, the correlation coefficients of NEE, gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (R_{eco}) against T_s on most of the measurement days were smaller than those against T_a or T_c , but the correlation coefficients for NEE, GPP and R_{eco} against T_a and T_c showed no difference. On seasonal scale, the relationships between GPP, NEE, R_{eco} and all the temperatures (T_a , T_c and T_s) showed a significant parabola-shape. Optimal temperature of T_c for photosynthesis was slightly lower than that of T_a , but the difference between the optimal T_a and T_c was only about 1°C. Relationship between R_{eco} and T_a for the two-year measurement data was better than that with T_s , but correlation coefficients of R_{eco} with T_c and T_a had nearly no difference ranging from 0.95 to 0.96. Our results could give some implications for ecosystem carbon exchange estimation with remote sensing method based on canopy temperature.

Key words: winter wheat; carbon flux exchange; canopy radiation temperature; air temperature; soil temperature

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 其与大气间的物质交换在当前全球碳循环研究中占有非常重要的地位. 前人研究表明, 温度是影响陆地生态系统碳通量季节动态的一个重要环境因子^[1, 2], 包括土壤温度和大气温度. 植物的光合作用速率与气温的关系通常为抛物线型^[3]. 当温度较低时, 植物的光合速率随着气温的升高而上升; 而当温度较高时, 植物的光合速率随温度的升高而下降. 通常认为生态系统呼吸及其组分对温度的响应呈指数增长规律, 在一定温度范围内, 呼吸随温度的增加呈指数增长, 当温度达到 45 ~ 50°C 时呼吸速率达到最大值; 超过一定的温度界限, 酶的分解速率将下降, 呼吸将会受到抑制. 在生态系统水平上, 植物对地下部分呼吸底物的供给也受到温度驱动, 而对土壤呼吸产生影响^[4, 5]. 在区域或全球尺度上,

温度也被证明是影响土壤呼吸的重要因素^[6]. 冠层温度指作物冠层茎、叶表面温度的平均值, 是植物表面能量平衡的主要决定因子. 与气温相比, 叶片和植物的生理活动与它们的本体温度的关系更为密切, 在植被盖度较高的样地, 植被冠层上方叶子的生理活动与陆地表面温度的关系极为密切^[7]. 而对于稠密的植被而言, 陆地表面温度就是植被群体的冠层辐射温度. Sims 等^[7]构建了一个基于陆地表面温度(LST)和增强植被指数(EVI)的温度绿度模型(TG model), 他们认为陆地表面温度除了与植被辐

收稿日期: 2015-12-15; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 山西省基础研究项目(2014011032-1); 山西省高等学校科技创新项目(2015115); 国家自然科学基金项目(41130528)

作者简介: 李洪建(1958~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: hongli@sxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

射温度有明显的相关关系外,与水汽压亏缺和光合有效辐射相关性都很显著.用 TG 模型对北美 11 个通量塔的总初级生产力的模拟结果表明,使用增强植被指数和陆地表面温度的 TG 模型预测的结果在许多通量塔与 MODIS GPP 产品相比结果都有很大的改进,但是在植被盖度低的灌木群落由于太阳高度角对植被指数的影响较大, TG 模型和 MODIS GPP 产品模拟的效果都较差.最近的研究也表明,陆地表面辐射温度在模拟生态系统呼吸、土壤呼吸的时空变异方面切实可行^[8~11].因此运用植物冠层辐射温度估算生态系统碳交换非常重要.然而,作物冠层辐射温度对农田生态系统碳通量的影响尚未见报道.本研究用箱式法对太原盆地冬小麦碳通量进行了连续 2 a 的定位测定,主要研究:冬小麦生态系统碳通量的日、季节变化规律;对比分析日、季节尺度上,土壤温度、气温和冠层辐射温度与冬小麦碳通量之间的关系,以期为基于遥感观测的冠层辐射温度在模拟碳通量中的应用提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验地概况

本实验在山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站进行.该站位于山西省太原盆地太谷县境内(112°30'E,37°26'N),海拔 780 m,属暖温带大陆性干旱半干旱气候区.该地区年平均日照时数为 2 500~2 600 h,多年平均气温为 9.9℃,7 月平均最高为 24.2℃,1 月平均最低为 -5.7℃.根据山西省水文水资源勘测局太谷均衡实验站的小型气象站 1956~2000 年这 44 a 的气象记录资料,多年平均降水量 415.2 mm,主要集中在 6~9 月.观测年 2009 年、2010 年的年降雨量分别为 497.3 mm 和 333.5 mm.多年月平均相对湿度 8 月最大为 82%,4 月最小为 62%,相对湿度年际变化不大,变化范围从 66%~90%.最大冻土深度为 92 cm,全年无霜期 220 d.区内土壤为冲积黄土,是太原盆地主要的粮食生产土壤类型,土层深厚,土壤容重为(1.42±0.03) g·cm⁻³(平均值±标准差,下同),土壤持水量(干土重%)为 22.21%±0.46%,有机质含量为 4.11%±0.15%,全氮含量为 0.12%±0.01%,速效磷含量为(8.49±1.39) mg·kg⁻¹,速效钾含量为(225.00±45.23) mg·kg⁻¹.

1.2 供试材料

实验所用小麦为冬小麦,于每年的 9 月下旬播种,次年 7 月上旬收获.田间管理按当地农民习惯

进行.

1.3 实验设计

选择 2 块 10 m×15 m 的样地,在第一次观测前一天,在每一块样地中选择本底条件一致,小麦密度和生长具有代表性的 3 个 1.5 m×1.5 m 的小区,两块样地共 6 个小区.在每个处理小区中央嵌入一个铝合金框架(内长宽各为 50 cm,高为 10 cm,插入地下 5 cm),整个测定期固定在同一位置,用于碳通量测定.取 6 个小区的平均值作为每次测定的值.

1.4 测量方法

CO₂ 通量用 50 cm×50 cm×50 cm(后期小麦高后用 50 cm×50 cm×70 cm)的透明箱体连接 Li-6400 便携式光合作用测量仪(Li-Cor Inc., USA)来测定,测定方法与文献[12~17]基本一致.测定时,将透明箱体放在提前嵌入田间的不锈钢支架的底座上.各个小样方内每隔 10 s 记录一次 CO₂ 浓度,连续记录 9 个数值.根据通量箱中 CO₂ 浓度变化率计算净生态系统碳交换量(NEE).然后抬起箱体通风约 30 s,保证与外界空气的充分交换,再重新罩在原位置并用一块遮光布盖住整个箱体.等待箱体内气体浓度稳定后,再重复前面气体通量的测量.由于第二次测定是在遮光状态下进行的,所以其数值可以认为是生态系统呼吸(R_{eco}).总初级生产力(GPP)为 NEE 与 R_{eco} 的代数和.

$$GPP = NEE + R_{eco} \quad (1)$$

式中,NEE 和 R_{eco} 表示生态系统的 C 固定和释放量.其中,NEE 为正值表示生态系统净吸收 CO₂,为负值表示释放.相反, R_{eco} 为正值表示生态系统净释放 CO₂,为负值表示吸收.

在观测气体交换的同时,同步测量了光合有效辐射(PAR)、10 cm 深度的土壤温度(T_s)、气温(T_a)、冠层辐射温度(T_c).光合有效辐射(PAR)、箱体内气温(T_a)、10 cm 深度的土壤温度(T_s)分别用 LI-190SA 光量子传感器、E 型热电偶和 6400 温度探针测定,数据由 Li-6400 间隔 10 s 记录一次,共记录 9 个数据.冠层辐射温度(T_c)用德国产 OptrisCT02(光学分辨率为 2:1,视场角为 28°)红外温度探测仪测定.为了尽可能减少土壤背景的影响,该红外温度仪与水平面呈 30°角悬挂在箱体内距离作物冠层 0.2~0.4 m 处,数据由笔记本电脑以 10 s 的间隔同步记录,共记录 9 个数据,取平均值作为每次测定的冠层辐射温度值.

在每次测定结束时,用土钻挖取 0~10、10~20 和 20~30 cm 深度的土样,混合均匀后,装入土盒,3

个重复,带回实验室,105℃条件下烘至恒重,求 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 深度的土壤重量含水量(干土重,%; W_{10} 、 W_{20} 、 W_{30}). 计算公式为:

$$\text{土壤水分(干土重, \%)} = \frac{(W_1 - W_2)}{(W_2 - W_0)} \times 100 \quad (2)$$

式中, W_0 为铝盒质量; W_1 为烘干前铝盒及土样质量; W_2 为烘干后铝盒及土样质量; 三者单位均为 g. 取 3 个重复的土壤水分平均值作为该测定点的土壤含水量(质量分数, %).

每年测定开始于 4 月初,基本 1 周 1 次,6 月底结束. 每天测定从早上 06:00 ~ 08:00 开始,1 h 间隔测定一次,至 PAR 低于 $50 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 结束. 日变化于 2009 年 5 月 23 日(冬小麦抽穗期)从 06:00 开始测定,至 5 月 24 日 09:00 结束,共测定 22 轮,白天测定间隔为 1 h、夜间间隔为 2 h.

1.5 数据处理

1.5.1 CO_2 通量计算

利用下式计算特定箱内生态系统或土壤与大气间的交换通量^[17]:

$$A = dc/dt \times V/S \times P/RT \quad (3)$$

式中, A 是单位面积上单位时间内 CO_2 释放量 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], c 是 CO_2 摩尔浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$); t 是时间 (s); V 是通量箱体积 (m^3); S 是通量箱底面积 (m^2); P 是大气压 (kPa); R 是气体常数 [$8.3 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$]; T 是通量箱内气体温度 (K). 方程中的 dc/dt 是通量箱中浓度变化率,即将所测得的一组 CO_2 浓度及其相应的时间回归所得直线方程的斜率.

1.5.2 数据统计分析

用 SPSS 17.0 做统计分析. 用相关分析方法分析冬小麦日、季节尺度上 T_s 、 T_a 、 T_c 及 PAR 的相关关系和不同测定日温度与 CO_2 通量的相关关系; 用

Curve Estimation 对碳通量的季节变化与温度的季节变化进行回归分析. 所有统计的显著性水平均为 0.05. 所有图件利用 Sigmaplot 10.0 绘制.

2 结果与分析

2.1 CO_2 通量的日变化规律

图 1 为冬小麦抽穗期碳通量和环境因子的日变化图. 从中可以看出,1 天中,冬小麦生态系统 GPP 的日变化呈现出双峰的日变化,GPP 主要受 PAR 控制,日出后随着太阳高度角的增高及光合有效辐射的增强,冬小麦光合速率也迅速升高,在上午 10:00 左右达到一天中的最大值为 $35.54 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,而此时 PAR 并没有达到最高,之后由于水分供应不足,气孔的阻抗增大,使 GPP 受阻,GPP 随着 PAR 的进一步升高而表现出降低,存在明显的“午休”现象,到下午 14:00 左右出现第二个峰值为 $30.27 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,之后随着光合有效辐射的减弱而下降速度增大,日落后 GPP 降至 $0 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 而 R_{eco} 的日变化主要由气温控制,日出后随着温度的升高而升高,至午后 13:00 左右达到最大值为 $14.11 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,而后下降,到凌晨 03:00 左右达到最低值为 $5.29 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. NEE 为 GPP 与 R_{eco} 的差值,作物生长盛期白天主要受 GPP 控制,夜间为 R_{eco} ,因此,白天 NEE 为正值,夜间为负值,一天中的最大值也出现在上午 10:00 左右,而后逐渐下降至日落前 PAR 低于光补偿点时变为负值.

图 2 为两年冬小麦从返青期至成熟期 CO_2 通量日间测定的动态变化. 从中可以看出,冬小麦样地不同生育时期 CO_2 通量存在明显的日际和季际变化. 不同生育期 CO_2 通量的日变化呈倒“U”型,但不同生育期倒“U”型高度不同,返青期至抽穗孕

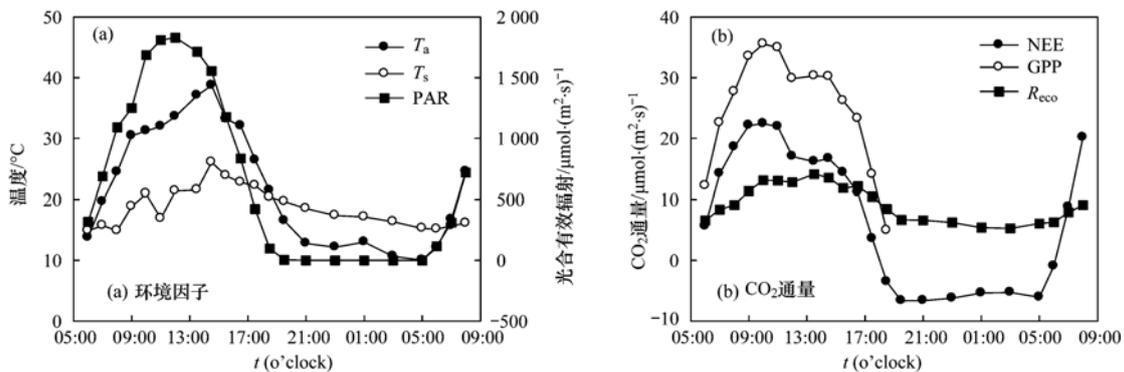


图 1 冬小麦抽穗期环境因子和 CO_2 通量的日变化

Fig. 1 Daily changes of the environmental factors and CO_2 flux in the heading period of winter wheat

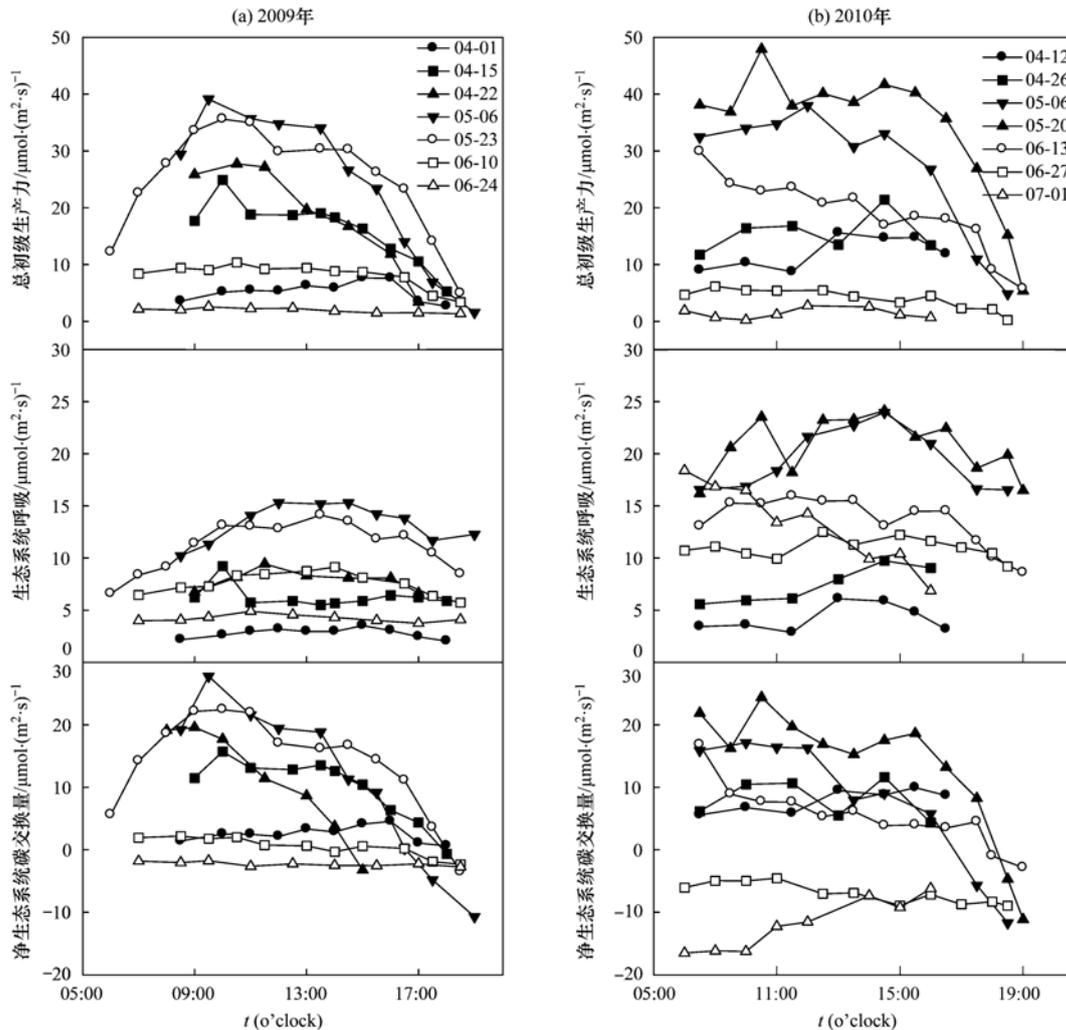


图2 2009年、2010年冬小麦不同生育期总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R_{eco})和净生态系统碳交换量(NEE)的日变化

Fig. 2 Daily changes of GPP, R_{eco} and NEE in different periods of the growing season of the winter wheat in 2009 and 2010

穗期,逐渐增高,而后逐渐下降,至成熟期最低.白天的NEE在返青期至灌浆期均为正值,成熟期(2009年6月17日和2009年6月24日、2010年6月27日和2010年7月1日)转为负值,说明冬小麦在成熟期变成碳源.

2.2 CO_2 通量的季节变化特征

图3为冬小麦测定期间环境因子和碳通量的季节变化,其中数据为每个测定日的平均值.从中可以看出, T_a 、 T_s 的季节变化趋势与PAR的变化趋势相一致,随着PAR的波动而波动,总体呈上升的趋势.由于受到灌溉及降水的影响,土壤水分没有规律可循.冬小麦生态系统的NEE、GPP和 R_{eco} 呈明显的季节变化.NEE的季节变化主要受温度和作物叶面积的共同影响.返青后,随温度升高,小麦活性增强,冠层叶片与大气间有了 CO_2 交换,随叶面积增加和PAR增强,小麦冠层 CO_2 通量达到一定数

值,成为一个小的碳汇;灌浆期前,冬小麦的NEE一直增加;抽穗孕穗期NEE达到最高;之后,随着呼吸作用的增强,NEE有所下降,成熟期部分绿色叶片变黄乃至衰亡,使小麦冠层光合能力下降,在小麦收割前约1周左右,由碳汇变成碳源.

2.3 冠层辐射温度与气温、土壤温度之间的关系

植物冠层温度是由土壤-植物-大气连通体内的热量和水汽流决定的,取决于环境因子和植物本身因素,反映植物冠层的能量平衡状况以及植物和大气之间的能量交换.以2010年测定数据为例,对冬小麦每个测定日的 T_s 、 T_a 、 T_c 及PAR进行相关性分析.结果表明, T_a 和 T_c 之间的泊松相关系数都在0.90以上,2尾显著性检验均为极显著水平,表明在日尺度上 T_c 与 T_a 的差异不大,可以用来代替 T_a 来研究温度对GPP及 R_{eco} 的影响;除极个别天外, T_s 与 T_a 和 T_c 之间相关都不显著;PAR与 T_a 和 T_c 的

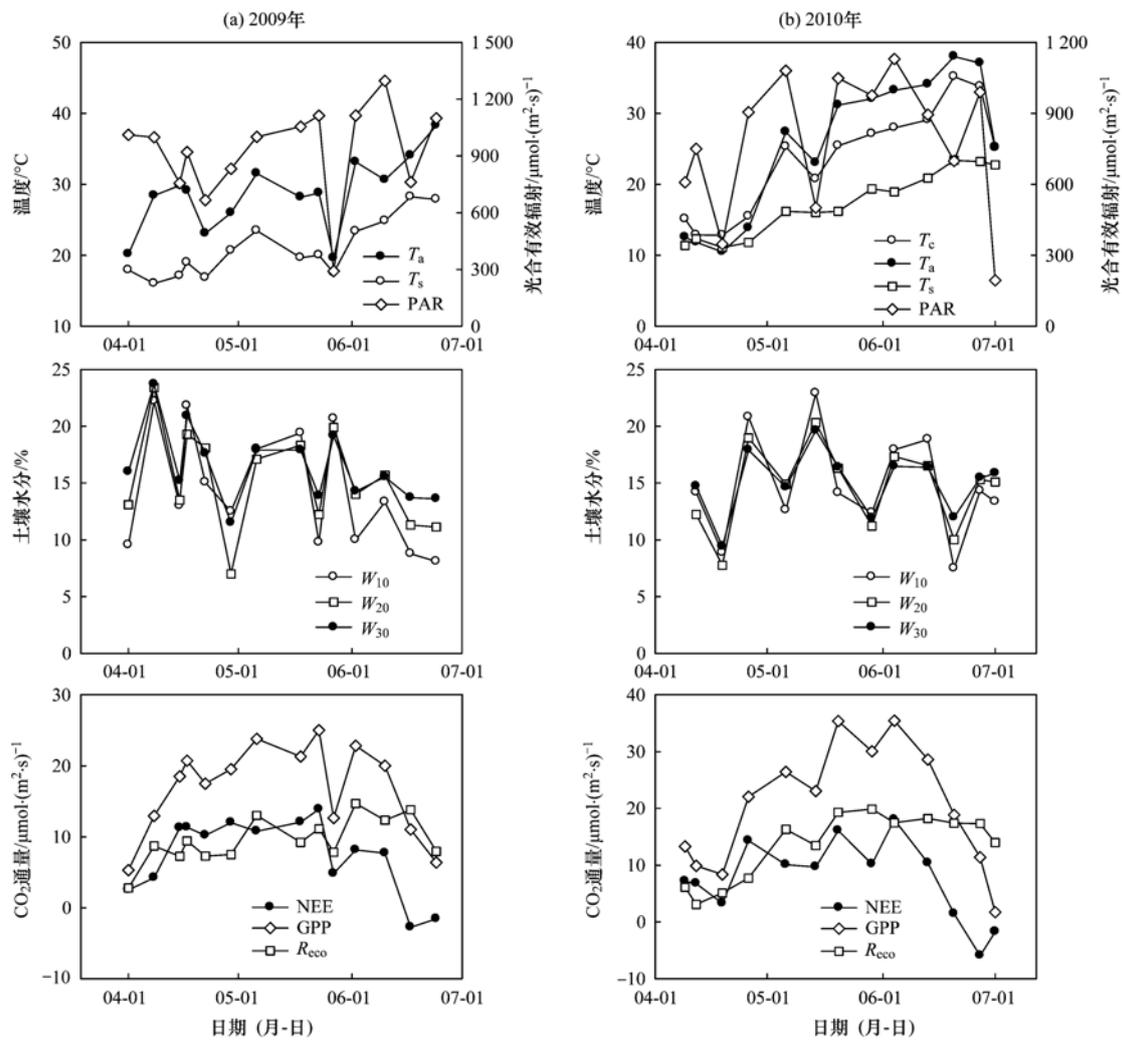


图3 冬小麦测定期间环境因子、CO₂通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of the environmental factors and carbon flux in the winter wheat measuring period

相关系数除阴天外,其余天都达到显著水平,与 T_s 的相关系数大部分测定天均不显著(表1). 对每个测定日各环境因子的平均值进行泊松相关性分析,结果表明两年测定的 T_a 和 T_c 之间的泊松相关系数分别为0.96(2009年)和0.98(2010年),2尾显著性检验均为极显著水平; T_s 与 T_a 、 T_c 都呈极显著相关, T_s 与 T_a 之间的相关系数均低于与 T_c 的(表2).

2.4 CO₂通量日变化与温度的关系

图4为冬小麦抽穗期生态系统 NEE、GPP 和 R_{eco} 的日变化与温度日变化的散点关系. 可以看出, NEE 和 GPP 随着温度的变化表现出显著地“不对称”变化,其原因是上午随着温度的升高而迅速增大,并在10:00左右达到一天中的最大值,而此时温度并没有达到最高,之后 NEE 随着温度在午后的进一步升高而表现出降低. 生态系统 NEE 的这种“环

形”变化和叶片尺度上的测定比较相似,上午 NEE 随温度的升高和辐射、水分条件适宜有关,而午后的降低则反映了高光强和高水分散失的胁迫影响. 对冬小麦抽穗期24 h测定的 NEE、GPP 和 R_{eco} 与 T_a 和 T_s 的泊松相关性分析表明, NEE、GPP 和 R_{eco} 与 T_a 都呈极显著相关,相关系数 r 分别为0.81、0.98、0.69; NEE 和 GPP 与 T_s 相关都不显著, R_{eco} 与 T_s 极显著相关,相关系数 r 为0.69.

表3为2010年冬小麦不同测定日白天测定的温度与 NEE、GPP 和 R_{eco} 日变化的泊松相关系数. 从中可以看出, NEE 和 GPP 与 T_a 和 T_c 的相关系数在起身期(4月12日)都显著相关;在拔节期(4月26日)都相关不显著,其原因可能与该测定日半天阴天,温度变化范围小有关;在孕穗(5月6日和5月14日)、抽穗期(5月20日)和灌浆期(6月4日、6月13日和6月20日)相关系数都显著相关;在成熟期(6月27日和7月1日)相关性下降,

表 1 冬小麦不同测定日环境因子之间的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficients of daily changes among the environmental factors on different measurement day in the winter wheat growing season

测定日期	<i>n</i>	T_s	T_a	T_c	PAR	测定日期	<i>n</i>	T_s	T_a	T_c	PAR
2010-04-12	7	T_s	1			2010-06-04	14	1			
	7	T_a	0.91**	1			14	-0.26	1		
	7	T_c	0.86*	0.97**	1		14	-0.32	0.98**	1	
	7	PAR	0.71	0.92**	0.93**		1	14	-0.68**	0.82**	20
2010-04-19	5	T_s	1			2010-06-13	12	1			
	5	T_a	-0.37	1			12	-0.19	1		
	5	T_c	-0.25	0.99**	1		12	0.20	0.89**	1	
	5	PAR	-0.66	0.94*	0.89*		1	12	-0.53	0.84**	0.57
2010-04-26	6	T_s	1			2010-06-20	6	1			
	6	T_a	0.66	1			6	-0.36	1		
	6	T_c	0.77	0.94**	1		6	-0.36	0.99**	1	
	6	PAR	0.52	0.65	0.52		1	6	-0.34	0.76	0.80
2010-05-06	9	T_s	1			2010-06-27	11	1			
	9	T_a	-0.25	1			11	0.20	1		
	9	T_c	-0.31	0.97**	1		11	0.27	0.99**	1	
	9	PAR	-0.71*	0.80**	0.83**		1	11	-0.72*	0.46	0.37
2010-05-14	10	T_s	1			2010-07-01	8	1			
	10	T_a	-0.34	1			8	0.20	1		
	10	T_c	-0.37	0.97**	1		8	0.09	0.99**	1	
	10	PAR	-0.68*	0.78**	0.79**		1	8	-0.20	0.86**	0.86**
2010-05-20	12	T_s	1								
	12	T_a	-0.45	1							
	12	T_c	-0.32	0.98**	1						
	12	PAR	-0.76**	0.84**	0.76**	1					

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$, 下同

表 2 冬小麦季节尺度上环境因子之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of seasonal changes of environmental factors in the winter wheat growing season

年份	温度/°C	<i>n</i>	T_s	T_a	T_c	W_{10}	W_{20}	W_{30}
2009	T_s	14	1			-0.56*	-0.51	-0.56*
	T_a	14	0.77**	1	*	-0.35	-0.28	-0.30
	T_c	9	0.88**	0.96**	1	-0.60	-0.36	-0.36
2010	T_s	13	1			-0.18	0.02	0.02
	T_a	13	0.89**	1		-0.11	0.11	0.06
	T_c	13	0.93**	0.98**	1	-0.19	0.05	0.01

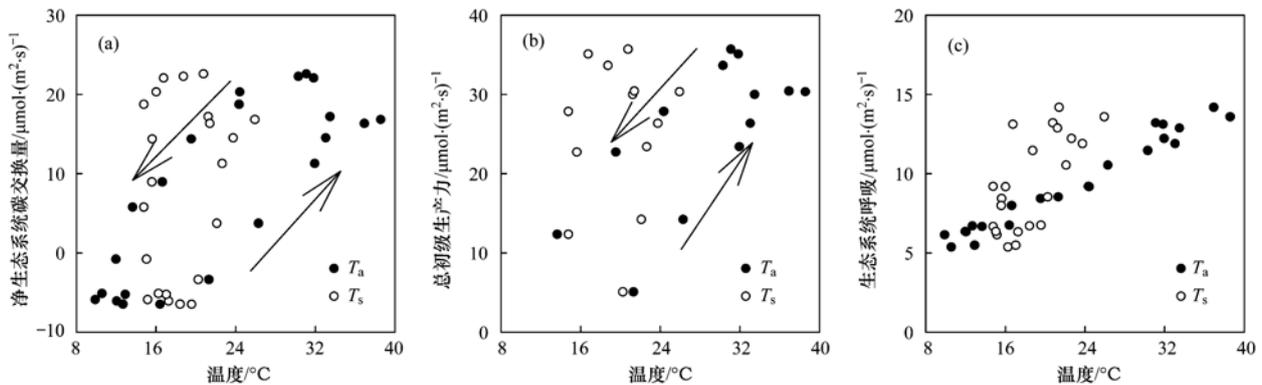


图 4 冬小麦抽穗期净生态系统碳交换量 (NEE)、总初级生产力 (GPP) 和生态系统呼吸 (R_{eco}) 的日变化对温度的响应

Fig. 4 Response of daily changes of NEE, GPP and R_{eco} to the temperatures during the heading period of winter wheat

表 3 2010 年冬小麦不同测定日温度与 CO₂ 通量的相关系数Table 3 Correlation coefficients of the temperature to CO₂ flux in the winter wheat growing season in 2010

测定日期	<i>n</i>	温度	NEE	R_{eco}	GPP	测定日期	<i>n</i>	NEE	R_{eco}	GPP
2010-04-12	7	T_s	0.51	0.30	0.43	2010-06-04	14	-0.83**	-0.15	-0.73**
	7	T_a	0.78*	0.65	0.78*		14	0.65*	0.89**	0.79**
	7	T_c	0.84*	0.66	0.79*		14	0.67**	0.95**	0.80**
2010-04-26	6	T_s	-0.67	-0.01	-0.57	2010-06-13	12	-0.49	-0.36	-0.46
	6	T_a	0.02	0.50	0.14		12	0.91**	0.93**	0.93**
	6	T_c	-0.08	0.29	0.01		12	0.73**	0.77**	0.74**
2010-05-06	9	T_s	-0.83**	0.09	-0.75*	2010-06-20	6	-0.42	-0.18	-0.35
	9	T_a	0.72*	0.87**	0.80*		6	0.97**	0.87	0.95*
	9	T_c	0.74*	0.87**	0.82**		6	0.95*	0.90*	0.95*
2010-05-14	10	T_s	-0.88**	0.52	-0.84**	2010-06-27	11	-0.93**	0.47	-0.64*
	10	T_a	0.65*	0.13	0.71*		11	0.17	0.91**	0.62*
	10	T_c	0.67*	0.14	0.74*		11	0.08	0.94**	0.55
2010-05-20	12	T_s	-0.69*	-0.25	-0.61*	2010-07-01	8	-0.19	-0.45	0.19
	12	T_a	0.86**	0.86**	0.92**		8	-0.67	-0.69	0.67
	12	T_c	0.80**	0.86**	0.87**		8	-0.66	-0.60	0.66

基本都不显著;表明不同生育期温度对 NEE 和 GPP 所起的作用不同,在作物生长早期,温度起的作用较大,而到生长后期作物生长主要受物候影响。总体来看,NEE 和 GPP 与 T_s 的相关系数绝大部分都低于与 T_a 和 T_c 的,而与 T_a 和 T_c 的相关系数差异不大,表明冬小麦生态系统日尺度上 T_c 可以代替 T_a 来计算温度对碳通量的调节系数。

R_{eco} 与 T_a 和 T_c 的相关系数都好于与 T_s 的,除测定日为阴天(4月12日、4月26日和5月14日)和成熟末期(7月1日)的相关系数不显著外,其余天都达到了显著水平。 R_{eco} 与 T_c 的相关系数一般都大于与 T_a 的,表明在日尺度上 T_c 可以代替 T_a 来研究温度与生态系统呼吸的关系,进而估算日生态系统呼吸总量。

2.5 CO₂ 通量季节变化与温度的关系

对每一天测定的 T_s 、 T_a 、 T_c 、GPP、 R_{eco} 和 NEE 取日平均值,利用 SPSS 的“Curve Estimation”对碳通量与温度进行回归分析,结果表明两年冬小麦的

GPP、NEE 和 R_{eco} 与温度都呈显著的二次抛物线关系。

冬小麦生态系统光合作用与温度的相关关系表现为明显的二次曲线特征。因此,可以通过温度响应曲线中拐点出现时的对应温度来确定冬小麦生态系统的最佳温度。2009 年 T_a 和 T_s 的最佳温度分别为 28.6℃ 和 21.9℃;2010 年 T_c 、 T_a 和 T_s 的最佳温度分别为 24.9、26.3 和 17.8℃(表 4)。2009 年部分测定日红外测温仪损坏,导致无法分析 T_c 对 GPP 的影响,仅从 2010 年的分析结果来看, T_c 的最佳温度略低于 T_a 的,但差异不大在 1℃ 左右,这主要是因为植物不受水分胁迫时,蒸腾散热导致 T_c 低于 T_a 引起的,这说明在群体尺度上 T_c 可以用来代替 T_a 来计算光合作用的温度三参数,但计算时需要结合水分状况分别确定。2009、2010 年 GPP 与 T_c 、 T_a 、 T_s 二次函数的决定系数分别为 0.67、0.62、0.55 和 0.80、0.69、0.73。两年 GPP 与 T_c 的关系均好于 T_a 和 T_s 的。

表 4 冬小麦季节尺度 GPP 与温度拟合回归方程

Table 4 Fitted equation between GPP and the temperatures over the season in the winter wheat growing period

年份	温度	<i>n</i>	回归方程	R^2	<i>F</i>	<i>P</i>	T_{opt}
2009	T_c	9 ¹⁾	$GPP = -0.079 T_c^2 + 4.01 T_c - 30.797$	0.67	6.14	0.035	25.38
	T_a	14	$GPP = -0.15 T_a^2 + 8.5855 T_a - 102.15$	0.62	8.89	0.005	28.62
	T_s	14	$GPP = -0.3417 T_s^2 + 14.9620 T_s - 141.31$	0.55	6.71	0.012	21.89
2010	T_c	12	$GPP = -0.1517 T_c^2 + 7.5426 T_c - 62.904$	0.80	17.45	0.001	24.86
	T_a	12	$GPP = -0.0935 T_a^2 + 4.926 T_a - 33.36$	0.69	10.03	0.005	26.34
	T_s	12	$GPP = -0.4819 T_s^2 + 17.11 T_s - 120.65$	0.73	12.32	0.003	17.75
2009~2010	T_c	21	$GPP = -0.098 T_c^2 + 4.986 T_c - 0.098$	0.51	9.38	0.002	25.44
	T_a	26	$GPP = -0.045 T_a^2 + 2.550 T_a - 13.577$	0.24	3.66	0.042	28.33
	T_s	26	$GPP = -0.167 T_s^2 + 6.417 T_s - 38.981$	0.28	4.37	0.025	19.21

1) 部分测定日红外测温仪损坏,下同

回归分析表明,两年冬小麦的 R_{eco} 与温度均呈显著的二次曲线关系(表 5). 2009 年 R_{eco} 与 T_a 、 T_s 二次函数的决定系数分别为 0.50 和 0.43. 2010 年

冬小麦的 R_{eco} 与 T_c 、 T_a 和 T_s 二次曲线的决定系数分别为 0.95、0.96 和 0.86. 两年样地的 R_{eco} 与 T_a 的关系均好于与 T_s 的.

表 5 冬小麦季节尺度 R_{eco} 与温度拟合回归方程

Table 5 Fitted equation between R_{eco} and the temperatures over the season in the winter wheat growing period

年份	温度	n	回归方程	R^2	F	P
2009	T_c	9	$R_{eco} = -0.039 T_c^2 + 2.373 T_c - 24.608$	0.48	2.78	0.140
	T_a	14	$R_{eco} = -0.0318 T_a^2 + 2.1798 T_a - 26.021$	0.50	5.45	0.023
	T_s	14	$R_{eco} = -0.0648 T_s^2 + 3.3407 T_s - 31.041$	0.43	4.18	0.045
2010	T_c	13	$R_{eco} = -0.0451 T_c^2 + 2.7798 T_c - 24.545$	0.95	85.65	0.000
	T_a	13	$R_{eco} = -0.0216 T_a^2 + 1.5747 T_a - 10.513$	0.96	107.90	0.000
	T_s	13	$R_{eco} = -0.1878 T_s^2 + 7.4589 T_s - 55.589$	0.86	31.46	0.000
2009 ~ 2010	T_c	21	$R_{eco} = -0.034 T_c^2 + 2.137 T_c - 18.701$	0.53	10.75	0.001
	T_a	27	$R_{eco} = 0.002 T_a^2 + 0.358 T_a + 0.198$	0.50	11.34	0.000
	T_s	27	$R_{eco} = -0.061 T_s^2 + 2.819 T_s - 18.824$	0.27	4.54	0.021

净生态系统 CO_2 交换量 (NEE) 是生态系统光合作用碳吸收与呼吸作用碳排放间的收支差额,环境因子通过直接影响生态系统的光合和呼吸作用而间接地决定生态系统的净 CO_2 交换量. NEE 随温度的增加都呈二次曲线变化,即 NEE 随温度的升高而增加,并在达到最适温度时 NEE 最大,之后随着温度继续增加 NEE 又开始减小(表 6). 这说明在温度适中的条件下冬小麦生态系统具有较大的碳吸收能力. 温度偏低时 NEE 减小可能是因为冬小麦生长季早

期生长潜力较弱,而在温度高时减小可能是因为太原盆地冬小麦的光合能力在 5 月下旬的抽穗期达到最高,6 月温度继续升高,此时冬小麦正处于灌浆期,光合能力已开始下降. 2009 年 NEE 的最适气温、土壤温度分别为 27.11°C 和 20.98°C; 2010 年最适冠层温度、气温和土壤温度 22.26、23.30 和 16.31°C. 2009 年的最适温度都高于 2010 年的,2010 年样地的最适冠层温度和最适气温的差异不大,说明可以用 T_c 来替代 T_a 计算 NEE 的温度三参数.

表 6 冬小麦季节尺度 NEE 与温度拟合回归方程

Table 6 Fitted equation between NEE and the temperatures over the season in the winter wheat growing period

年份	温度	n	回归方程	R^2	F	P	T_{opt}
2009	T_c	9	$NEE = -0.04 T_c^2 + 1.637 T_c - 6.188$	0.74	8.44	0.018	20.46
	T_a	14	$NEE = -0.1181 T_a^2 + 6.404 T_a - 43.113$	0.60	8.12	0.007	27.11
	T_s	14	$NEE = -0.2768 T_s^2 + 11.6164 T_s - 110.21$	0.74	15.75	0.001	20.98
2010	T_c	12	$NEE = -0.1012 T_c^2 + 4.5055 T_c - 35.828$	0.62	7.25	0.013	22.26
	T_a	12	$NEE = -0.0687 T_a^2 + 3.2017 T_a - 21.529$	0.45	3.66	0.069	23.30
	T_s	12	$NEE = -0.31 T_s^2 + 10.112 T_s - 68.255$	0.64	7.95	0.010	16.31
2009 ~ 2010	T_c	21	$NEE = -0.064 T_c^2 + 2.865 T_c - 20.094$	0.55	11.16	0.001	22.38
	T_a	26	$NEE = -0.047 T_a^2 + 2.196 T_a - 13.802$	0.30	4.85	0.018	23.36
	T_s	26	$NEE = -0.106 T_s^2 + 3.610 T_s - 20.266$	0.37	6.61	0.005	17.03

3 讨论

3.1 温度对总初级生产力的影响

植物光合作用的暗反应是一系列酶催化的生物化学反应,温度直接影响酶的活性和生化反应的速度,因而温度是影响植被光合作用的重要影响因子. 低温时酶活性和酶促反应速率都较低,限制了光合作用的进行,光合速率也较低; 高温光合速率降低的原因一方面是因为高温破坏了植物叶片叶绿体和细胞质的结构,另一方面是因为高温通过影响 PS II 和类囊体膜而影响光反应,降低了光反应为碳同化

所能提供的还原能力,另外高温也可以通过引起干旱、降低大气相对湿度等胁迫方式导致叶片气孔导度降低而间接影响光合作用^[3]. 在叶片和植物个体上的很多研究表明,光合作用对温度的响应曲线表现为二次曲线形式^[3, 18]. 本研究中,两年冬小麦的 GPP 与温度都呈显著的二次曲线形式,2009、2010 年土壤温度、气温分别能解释 GPP 季节变化的 55%、62% 和 73%、69%. 与森林生态系统、草地生态系统不同的是,冬小麦高温时 GPP 下降,一方面是温度高限制了植物的光合作用,另一方面,也是小麦自身的生长特点不同而导致的,6 月温度高,而

小麦进入了灌浆期,随着叶片及枝干的变黄,光合能力下降. 这一点从表 3 的分析结果也得到了证实, GPP 与气温在起身期、孕穗期、抽穗期和灌浆期都显著相关,在成熟期相关性下降、基本都不显著,表明在作物生长早、中期温度起的作用较大,而到生长后期作物生长主要受物候影响. 作物冠层温度是作物遗传特性和环境条件共同作用的结果,对叶片的功能期、蒸腾速率和光合能力都有较大的影响^[19]. 本研究中,日尺度上 GPP 与 T_s 的相关系数绝大部分都低于与 T_a 和 T_c 的,而与 T_a 和 T_c 的相关系数差异不大; 季节尺度上,2009 和 2010 年 T_c 分别能解释 GPP 的 67% 和 80%,高于 T_a 和 T_s 的解释比例(62%、55% 和 69%、73%). 表明冬小麦生态系统日、季节尺度上 T_c 均可以代替 T_a 来计算温度对碳通量的调节系数.

3.2 温度对生态系统呼吸的影响

生态系统呼吸是土壤微生物、根、叶和茎干呼吸的总和. 目前,大量研究认为温度和水分条件是影响生态系统呼吸的重要环境要素,通常认为生态系统呼吸对温度的响应呈指数增长规律^[4, 20-24]. 但是以生态系统中何处的温度作为环境指标,并没有明确的结论. 王森等^[21]研究表明阔叶红松林生态系统呼吸速率与大气和土壤温度之间呈显著的指数关系,大气和土壤温度能分别反映阔叶红松林生态系统呼吸的 87% 和 95%. 王春林等^[22]研究表明,冬季鼎湖山针阔叶混交林生态系统呼吸与 5 cm 土壤温度相关性最强,而夏季则与近地面空气温度相关性最强. 于贵瑞等^[23]研究也表明,长白山温带阔叶红松混交林生态系统呼吸与土壤表层温度相关性最强,而千烟洲亚热带人工针叶林与近地面空气温度相关性最强. 一些研究也发现基于遥感的地表温度能够在一定程度上解释生态系统呼吸^[7,8, 25-30]. 如 Rahman 等^[27]对北美 10 个通量塔观测的生态系统呼吸与来自 MODIS 11 陆地表面温度的产品的相关性研究表明,稠密植被的生态系统呼吸与陆地表面温度有一个极强的相关性,决定系数为 67%. Coops 等^[28]对英国道格拉斯冷杉生态系统 2 a 的观测表明,夜间生态系统呼吸与 8d 中最低 MODIS 陆地表面温度呈显著相关,决定系数为 57%. 孙小花等^[29]对黄土高原的旱地土壤呼吸的研究表明,在春小麦拔节期、孕穗期、灌浆期,豌豆分枝期、现蕾期和开花结荚期,土壤呼吸与冠层温度都呈现显著的线性相关,决定系数分别为 0.60、0.74、0.67、0.71、0.63、0.72,其中,春小麦孕穗期相关性最高,灌浆期次之;

豌豆开花结荚期相关性最高,分枝期次之. 本研究中,日尺度上, R_{eco} 与 T_a 和 T_c 的相关系数都好于与 T_s 的,除测定日为阴天(4月12日、4月26日和5月14日)和成熟末期(7月1日)的相关系数不显著外,其余天都达到了显著水平. R_{eco} 与 T_c 的相关系数一般都大于与 T_a 的,表明在日尺度上 T_c 可以代替 T_a 来研究温度与生态系统呼吸的关系,进而估算日生态系统呼吸总量. 季节尺度上,两年冬小麦的 R_{eco} 与温度均呈显著的二次曲线关系,与大多数关于非农田生态系统的温度与生态系统呼吸关系呈指数增长规律不一致,主要是因为冬小麦成熟期虽然土壤温度很高,但部分绿色叶片变黄乃至衰亡,地上部分呼吸骤减引起的,当去掉成熟期测定的数据后,温度与土壤呼吸的关系呈显著的指数关系. 两年样地的 R_{eco} 与 T_a 的关系均好于与 T_s 的,这主要是由于在观测的时段,冬小麦的 R_{eco} 中植物呼吸所占比例较大. 2010 年 R_{eco} 与 T_c 、 T_a 关系的决定系数差异不大(0.95 ~ 0.96),表明对冬小麦生态系统而言可以用 T_c 来模拟生态系统呼吸的季节变化及年总量.

4 结 论

(1) 日尺度上冬小麦的 T_a 和 T_c 之间的泊松相关系数都在 0.90 以上,2 尾显著性检验均为极显著水平; 季节尺度上两年测定的样地的 T_a 和 T_c 之间的泊松相关系数分别为 0.96 (2009 年) 和 0.98 (2010 年),2 尾显著性检验均为极显著水平,表明在日、季节尺度上 T_c 与 T_a 具有较好的一致性,可以用来代替 T_a 来研究温度对 GPP 及 R_{eco} 的影响.

(2) 日尺度上 NEE、GPP、 R_{eco} 与 T_s 的相关系数绝大部分都低于与 T_a 和 T_c 的,而与 T_a 和 T_c 的相关系数差异不大,表明在日尺度上 T_c 可以代替 T_a 来研究温度与碳通量的关系,可以用来计算温度对光合作用的调节系数.

(3) 季节尺度上两年冬小麦的 GPP、NEE 和 R_{eco} 与温度都呈显著的二次抛物线关系. T_c 的最适温度略低于 T_a 的,但差异不大在 1℃ 左右,说明在群体尺度上 T_c 可以用来代替 T_a 来计算光合作用的温度三参数,但计算时需要结合水分状况分别确定. 两年 R_{eco} 与 T_a 的关系均好于与 T_s 的. R_{eco} 与 T_c 、 T_a 关系的决定系数差异不大(0.95 ~ 0.96),表明对冬小麦生态系统而言可以用 T_c 来模拟 R_{eco} 的季节变化及年总量.

参考文献:

[1] 李轩然,孙晓敏,张军辉,等. 温度对中国典型森林生态系

- 统碳通量季节动态及其年际变异的影响[J]. 第四纪研究, 2014, **34**(4): 752-761.
- [2] 李峰, 李琪, 薛红喜, 等. 温度对克氏针茅草原生态系统生长季碳通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1453-1459.
- [3] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(2): 155-165.
- [5] 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.
- [6] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 [J]. Global Change Biology, 2002, **8**(8): 800-812.
- [7] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, *et al.* A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, **112**(4): 1633-1646.
- [8] Gao Y N, Yu G R, Li S G, *et al.* A remote sensing model to estimate ecosystem respiration in Northern China and the Tibetan Plateau [J]. Ecological Modelling, 2015, **304**: 34-43.
- [9] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Andrew Black T, *et al.* Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, **94**: 80-90.
- [10] Huang N, Gu L H, Niu Z. Estimating soil respiration using spatial data products: a case study in a deciduous broadleaf forest in the Midwest USA [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, **119**(11): 6393-6408.
- [11] Huang N, Wang L, Guo Y Q, *et al.* Modeling spatial patterns of soil respiration in maize fields from vegetation and soil property factors with the use of remote sensing and geographical information system [J]. PLoS One, 2014, **9**(8): e105150, doi: 10.1371/journal.pone.0105150.
- [12] Steduto P, Çetinkökü Ö, Albrizio R, *et al.* Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, **111**(3): 171-186.
- [13] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al.* Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe [J]. New Phytologist, 2008, **177**(1): 209-219.
- [14] Nakano T, Nemoto M, Shinoda M. Environmental controls on photosynthetic production and ecosystem respiration in semi-arid grasslands of Mongolia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(10): 1456-1466.
- [15] Li Y L, Tenhunen J, Owen K, *et al.* Patterns in CO₂ gas exchange capacity of grassland ecosystems in the Alps [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(1): 51-68.
- [16] Dhital D, Muraoka H, Yashiro Y, *et al.* Measurement of net ecosystem production and ecosystem respiration in a *Zoysia japonica* grassland, central Japan, by the chamber method [J]. Ecological Research, 2010, **25**(2): 483-493.
- [17] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 用于测定陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的多通道全自动通量箱系统 [J]. 生态学报, 2007, **27**(4): 1273-1282.
- [18] 武维华. 植物生理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 邓强辉, 潘晓华, 石庆华. 作物冠层温度的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2009, **28**(6): 1162-1165.
- [20] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, **8**(3): 315-323.
- [21] 王森, 刘亚琴, 郝占庆, 等. 长白山阔叶红松林生态系统的呼吸速率 [J]. 应用生态学报, 2006, **17**(10): 1789-1795.
- [22] 王春林, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统呼吸及其影响因子 [J]. 生态学报, 2007, **27**(7): 2659-2668.
- [23] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, **34**(S2): 84-94.
- [24] 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 等. 高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1075-1083.
- [25] Kitamoto T, Ueyama M, Harazono Y, *et al.* Applications of NOAA/AVHRR and observed fluxes to estimate 3 regional carbon fluxes over black spruce forests in Alaska [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2007, **63**(4): 171-183.
- [26] 方显瑞, 张志强, 查同刚, 等. 永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征 [J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2400-2409.
- [27] Rahman A F, Sims D A, Cordova V D, *et al.* Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(19), doi: 10.1029/2005GL024127.
- [28] Coops N C, Black T A, Jassal R S, *et al.* Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **107**(3): 385-401.
- [29] 孙小花, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(9): 2173-2180.
- [30] Jägermeyr J, Gerten D, Lucht W, *et al.* A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(4): 1191-1210.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行