

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响

吴杨周^{1,3}, 陈健³, 胡正华^{1,2,3*}, 谢燕³, 陈书涛^{2,3}, 张雪松^{2,3}, 申双和^{1,2*}, 陈曦³

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 通过田间控制试验, 设置对照(CK)、水分减少 30% (W)、增温 2°C (T)、水分减少 30% + 增温 2°C (TW) 这 4 种不同处理, 利用静态箱-气相色谱法测定土壤呼吸, 研究水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响. 结果表明, 在拔节-孕穗期, T 和 TW 显著增加了冬小麦地上生物量, 增幅分别为 46.0% ($P=0.002$) 和 19.8% ($P=0.032$); T 和 TW 也显著增加了收获的地上生物量, 增幅分别为 19.8% ($P=0.050$) 和 34.6% ($P=0.028$); 而 W 对地上生物量无显著影响; W、T 和 TW 处理都没有显著改变地下生物量. 相比于 CK, T 和 W 对土壤呼吸平均速率没有显著影响 ($P>0.05$); TW 使土壤呼吸平均速率降低了 22.4% ($P=0.049$). T 降低了土壤呼吸温度敏感性系数 (Q_{10}). 本研究表明水分与增温的复合处理对农田生态系统产生了与单一因子处理不同的生态效应.

关键词: 水分减少; 增温; 冬小麦; 生物量; 土壤呼吸

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0280-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.01.036

Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration

WU Yang-zhou^{1,3}, CHEN Jian³, HU Zheng-hua^{1,2,3*}, XIE Yan³, CHEN Shu-tao^{2,3}, ZHANG Xue-song^{2,3}, SHEN Shuang-he^{1,2*}, CHEN Xi³

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 3. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Field experiments were conducted in winter wheat-growing season to investigate the effect of reduced water and diurnal warming on wheat biomass and soil respiration. The experimental treatments included the control (CK), 30% reduced water (W), diurnal warming (T, enhanced 2°C), and the combined treatment (TW, 30% reduced water plus diurnal warming 2°C). Soil respiration rate was measured using a static chamber-gas chromatograph technique. The results showed that in the winter wheat-growing season, compared to CK, T and TW treatments significantly increased shoot biomass by 46.0% ($P=0.002$) and 19.8% ($P=0.032$) during the elongation-booting stage, respectively. T and TW treatments also significantly increased the harvested shoot biomass by 19.8% ($P=0.050$) and 34.6% ($P=0.028$), respectively. On the other hand, W treatment had no significant effect on shoot biomass, and W, T, and TW treatments didn't significantly change the root biomass. T and W treatments had no significant effect on the mean respiration rate (MRR) of soil ($P>0.05$). TW treatment significantly decreased soil MRR by 22.4% ($P=0.049$). We also found T treatment decreased the temperature sensitivity coefficients of soil respiration (Q_{10}). The results of our study suggested that compared to the single treatment (reduced water or diurnal warming), the combined treatment (reduced water plus diurnal warming) may have different effects on agroecosystem.

Key words: reduced water; diurnal warming; winter wheat; biomass; soil respiration

气候变暖是重要的全球环境问题, 其主要原因是大气中温室气体浓度的不断增加. CO_2 是温室效应贡献率最大的气体, 在大气中的浓度已由工业革命前的 278×10^{-6} 上升到目前的 390.5×10^{-6} [1]. 据估计, 气候变暖的趋势还将持续下去, 到 21 世纪中期我国平均气温可能升高 1.2 ~ 2.0°C, 21 世纪末将会升高 2.2 ~ 4.2°C [2]. 气温的升高势必会对农田作物生长及土壤过程产生影响. 由于全球地表平均温度升高引起的大气环流与水文模式发生的变化, 可能导致全球或区域降水格局发生改变. 有研究表

明, 我国 21 世纪降水格局变化大体趋势将是“南涝北旱” [3,4], 且这种两级分化的趋势仍将继续 [5,6]. 因此, 在农田生态系统研究中, 降水变化也是不容忽

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306046, GYHY201506001); 国家自然科学基金项目(41175136, 41375006); 江苏省大学生实践创新计划项目(201510300014); 江苏省“六大人才高峰”项目(2014-NY-015); 江苏省高校“青蓝工程”项目(2014)

作者简介: 吴杨周(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田地气碳氮交换与全球变化, E-mail: yangzhou_wu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn; yqzhr@nuist.edu.cn

视的重要因素。

研究表明,地表温度升高对作物生长和土壤微生物群落均有显著的影响。增温不仅降低叶绿素含量和光合速率^[7]、缩短作物生育期^[8,9]、减少作物产量^[8,10~13],而且影响土壤微生物的活性^[14,15]。降水量的变化改变土壤温湿度,影响作物生长,如有研究发现降水提高了棉花的水分生产力^[16]。余卫东等^[17]分析河南省 1981~2004 年主要农作物的生育期资料表明:2~5 月平均气温的升高是导致冬小麦生育期提前的主要原因之一,夏玉米生育期延迟的主要原因是 6~9 月总降水量的减少。刘涛等^[18]研究了增加降水和温度对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响,结果表明,荒漠草原土壤含水量是影响生物量的主要环境因子,并控制土壤呼吸的异质性。张凯等^[19]对半干旱地区春小麦进行模拟增温和降水变化的研究表明:增加 30% 降水有利于春小麦产量的提高,增温则不利于春小麦产量的提高,增温和增加 30% 降水复合处理也不利于春小麦产量的提高。王鹤龄等^[20]也开展了类似的工作,分析了降水变化和增温对西北半干旱地区春小麦产量的影响。土壤呼吸是土壤中生物代谢的结果,降水和温度的改变会影响到作物生长和土壤微生物群落的组成,进而影响土壤呼吸速率。

陆地土壤 CO₂ 排放是全球碳循环的一个重要

过程^[21],农田土壤呼吸在土壤 CO₂ 排放中有着重要的地位。但迄今为止,有关降水改变与增温对农田作物和土壤呼吸的影响,大多是将增温与降水变化这两个因子分开单独研究,对它们的复合效应研究较少^[19,20,22],而温度和降水这两个因子是相互关联协同影响农田生态系统。本研究通过田间控制试验,模拟田间水分和温度变化,并测定冬小麦生物量和土壤呼吸速率,分析降水改变和增温协同作用对农作物生物量和土壤呼吸速率的影响规律,以期为准评价区域气候变化背景下作物生长动态和农田温室气体排放量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验

田间试验于 2013~2014 年冬小麦生长季在南京信息工程大学农业气象与生态试验站(32.21°N, 118.72°E)进行。当地多年平均降水为 1 102 mm,平均温度为 15.6℃。试验地土壤为潜育型水稻土,灰马干土属,耕层土壤质地为壤质黏土,黏粒含量为 26.1%,土壤 pH(H₂O)值、有机碳和全氮含量分别为 6.64、35.49 g·kg⁻¹和 0.55 g·kg⁻¹。供试冬小麦品种为当地常规种植的扬麦 16。播种时间、播种密度以及肥料管理均与当地常规种植方法相同。冬小麦主要生育期和肥料管理见表 1。

表 1 冬小麦主要生育期与肥料管理¹⁾

Table 1 Main growth stages of winter-wheat and fertilization schedule

日期	生育期与肥料管理	日期	生育期
2013-12-03	播种,施基肥(复合肥,94 g·m ⁻² ,含 N15%,P15%,K15%)	2014-04-11	T 和 TW 处理植株扬花
2013-12-28	出苗	2014-04-13	CK 和 W 处理植株抽穗
2014-02-20	返青肥(尿素 34 g·m ⁻²)	2014-04-17	CK 和 W 处理植株扬花
2014-02-28	返青	2014-04-23	T 和 TW 处理植株灌浆
2014-03-25	拔节	2014-05-01	CK 和 W 处理植株灌浆
2014-03-30	T 和 TW 处理植株孕穗	2014-05-12	T 和 TW 处理植株成熟
2014-04-03	CK 和 W 处理植株孕穗	2014-05-17	CK 和 W 处理植株成熟
2014-04-09	T 和 TW 处理植株抽穗	2014-06-06	收获

1) CK,对照; T,增温 2℃; W,降水减少 30%; TW,增温 2℃ + 降水减少 30%

1.2 试验方法

1.2.1 水分与温度处理

根据丁一汇等^[2]和 Wan 等^[23]研究,控制试验中温度设置增加 2℃;根据程徐冰等^[24]研究,降水设置为减少 30%。田间控制试验共设 4 种处理:对照(CK)、增温(T,比 CK 叶面温度增加 2℃)、降水减少 30%(W)、增温 + 降水减少(TW,叶面温度增加 2℃和降水减少 30%)。每种处理有 3 个试验小区,共 12 个小区,小区采用随机方式排列。每个小

区面积为 2 m × 2 m,相邻小区间隔 0.5 m 并挖 40 cm 深的排水沟,以防止小区之间的物质交换。模拟增温和降水减少处理时间从出苗到收获。

本研究采用红外辐射加热管(管长 1.0 m,250 W)加热^[23],每个小区 3 根辐射加热管,安装在不锈钢灯罩中,平行排列悬挂在样地上方,进行昼夜不间断增温。红外辐射加热管能加热植株叶面和土壤,但不加热空气。每个加热管具有独立的电源控制开关,并由漏电保护总开关和定时器控制开

关. 经通电加热测试,各增温小区大部分区域能达到良好的增温效果(小区边缘与小区中间位置存在一定差异). 为了消除灯罩遮阴造成的误差,在不增温小区悬挂无加热管的灯罩. 红外辐射装置是国内外学者常用的增温方法,在电力充足的情况下,这种方法安装简单、维护方便,增温效果也比较理想^[18,25].

降水减少处理采用的是人工遮挡的方法,在W、TW 试验小区上方搭透明的PVC 阳光板作为遮雨板,每小区上方1.5 m 均匀排列6 块遮雨板,每块遮雨板长×宽为2.5 m×0.1 m. 遮雨板安装时与水平面保持一定的坡度,便于降水顺着遮雨板流下并进入沟渠. 遮雨板的总截面积为减少降水小区面积的30%,以此来达到降水减少30%的效果. 这种方法简易便于操作,在实际中得到广泛应用,如程徐冰等^[24]利用此方法截留降水研究长白山蒙古栎叶片生理生态特征对降水减少的响应.

1.2.2 生物量的测定

在关键生育期,在每个小区随机选取长势均匀的作物植株连根系及土壤一同挖出,洗净后分地上和地下部分,置于恒温箱中用105℃ 杀青半小时,然后用80℃ 烘干至恒重.

1.2.3 土壤呼吸的测定

通过测定土壤CO₂ 通量得到土壤呼吸速率,采用静态箱-气相色谱法^[26]. 采样底座为圆形无底钵(高10 cm,内径22 cm),上口有1.5 cm 深的凹槽,在采样时注水,使其与采样箱密封. 在每个试验小区安装1 个底座,底座内去除植株与杂草. 采样箱为PVC 的圆柱桶,高1 m,箱外先包裹一层海绵,然后覆盖铝箔,以避免采样时因太阳辐射而引起箱内温度变化. 用带有三通阀开关的60 mL 医用塑料针筒采集气样,分别于关箱后0、10、20 min 采集,样品量为50 mL,并记录箱内温度、土壤温度和湿度. 采样时间为08:00~10:00.

气样用经改装的Agilent-6890N 气相色谱仪检测CO₂ 混合比,通过对每组3 个样品的目标气体混合比与相应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行线性回归,求得CO₂ 的排放速率,再根据大气压、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、CO₂ 分子量等,求得单位面积的排放量^[26].

1.2.4 土壤温湿度的测定

使用WET-2 土壤水分温度电导率速测仪(Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK)测定5 cm 深土壤温度和土壤湿度(体积含水量).

1.3 统计分析

数据采用Office Excel 2010 进行计算分析,使用SPSS 17.0(SPSS Inc., Chicago, USA)对不同处理的植株生物量和土壤呼吸速率进行方差分析,分析不同处理间的生物量和土壤呼吸的差异及显著性.

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度

冬小麦生长季土壤温湿度如图1,CK、T、W 和TW 的土壤温度范围分别为4.7~22.6、5.1~22.7、4.5~22.6 和5.0~22.6℃. CK、T、W 和TW 的平均土壤温度分别为13.9、14.2、13.9 和14.1℃. 因为红外辐射加热管悬挂于作物冠层以上,主要是对作物叶片的加热,因作物遮挡,所以各处理间土壤温度相差不大. 但是返青期以前,CK、T、W 和TW 这4 种处理的平均土壤温度分别为5.2、6.3、5.2 和6.2℃,增温(T、TW)比不增温(CK、W)平均高1℃. 这是由于返青期之前,植株矮小,对土壤的加热效果较为明显.

CK、T、W 和TW 的土壤湿度变化范围分别为7.6%~28.8%、6.2%~28.1%、5.3%~26.1% 和5.1%~23.2%. CK、T、W 和TW 的平均土壤湿度分别为15.4%、14.4%、13.8% 和12.6%. 相比于CK、T、W 和TW 的土壤平均湿度分别降低了6.49%、10.39% 和18.18%,叶面截留、径流和增温导致的蒸散加快等因素降低了土壤湿度.

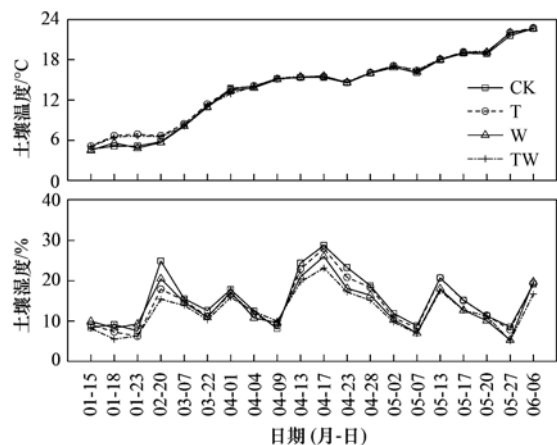


图1 冬小麦田土壤温湿度动态

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature and soil moisture in winter-wheat farmland

2.2 水分与增温处理对冬小麦生物量的影响

2.2.1 地上生物量

图2 为冬小麦地上生物量. 与CK 相比,在拔节-孕穗期,T 和TW 处理显著增加了地上生物量,

增幅分别为 46.0% ($P = 0.002$) 和 19.8% ($P = 0.032$)。在灌浆期和乳熟期, T、W 和 TW 处理对地上生物量的影响没有达到显著水平。从收获来看, T 和 TW 处理显著增加了地上生物量, 增幅分别为 19.8% ($P = 0.050$) 和 34.6% ($P = 0.028$), W 处理则无显著影响。

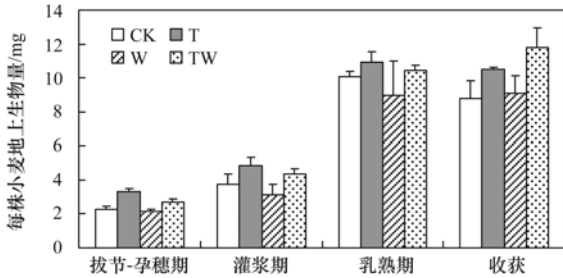


图2 不同处理对冬小麦地上生物量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on shoot biomass of winter-wheat

2.2.2 地下生物量

不同处理的冬小麦地上生物量见图3。与CK相比, T、W 和 TW 处理均没有显著改变地下生物量。

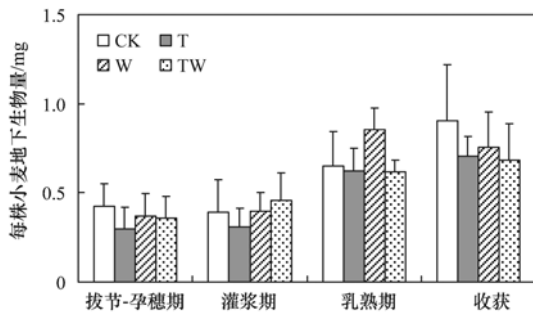


图3 不同处理对冬小麦地下生物量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on root biomass of winter-wheat

2.2.3 总生物量

在拔节-孕穗期, 与CK相比, T的冬小麦总生物量显著增加了34.1% ($P = 0.009$) (图4)。W与CK之间的总生物量无显著差异。TW处理使收获总生物量显著增加了29.1% ($P = 0.045$)。

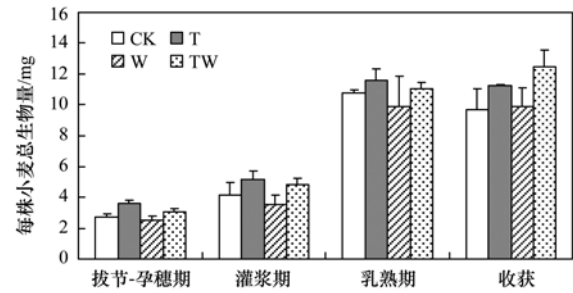


图4 不同处理对冬小麦总生物量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on total biomass of winter-wheat

2.3 水分与增温处理对土壤呼吸的影响

2.3.1 土壤呼吸速率的生长季变化规律

冬小麦生长季土壤呼吸速率的生长季变化见图5。CK、T、W 和 TW 处理的土壤呼吸速率都是从返青期后开始有缓慢升高, 并在拔节-孕穗期达到峰值, 随后又开始慢慢降低, 但总体上呼吸速率没有太大幅度的波动。各处理的土壤呼吸生长季变化基本相似, 均呈先增大后降低的趋势。结果表明, 降水减少、增温以及两者的复合处理都没有改变土壤呼吸的生长季变化规律。

从整个生育期来看, CK、T、W 和 TW 这4种处理的土壤呼吸平均速率(平均值 \pm SD) 分别为 (272.3 ± 26.4)、(292.2 ± 52.5)、(243.4 ± 6.0) 和 (211.3 ± 26.5) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。相比于CK, T和W处理无显著影响, TW使土壤呼吸平均速率降低了22.4% ($P = 0.049$)。

2.3.2 土壤CO₂累积排放量

图6是全生育期土壤CO₂累积排放量。与CK相比, T和W处理的影响都没有达到显著水平 ($P = 0.120, 0.340$), TW处理显著降低了CO₂累积排放量 ($P < 0.05$)。

2.3.3 土壤呼吸温度敏感性

土壤呼吸和土壤温度的关系见图7。CK、T、W

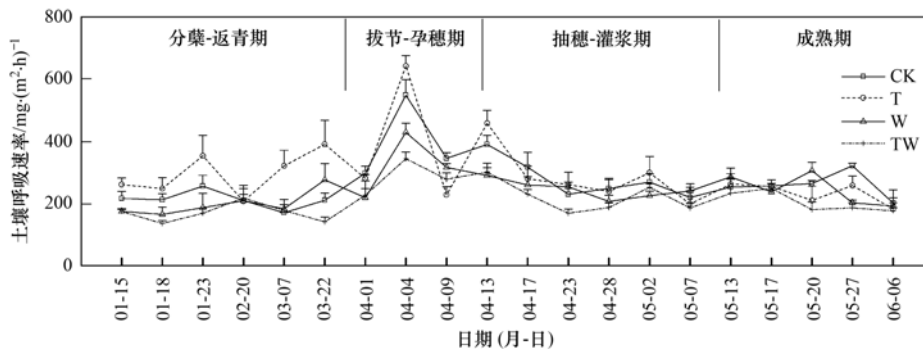


图5 不同处理对冬小麦生长季土壤呼吸的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil respiration rates in winter-wheat growing season

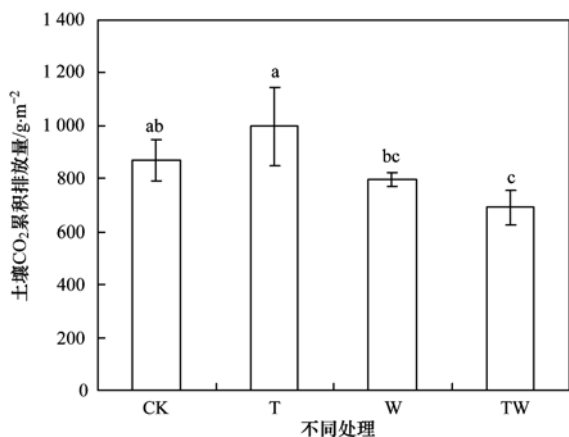


图 6 不同处理对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on cumulative emission amount of CO₂ from soil

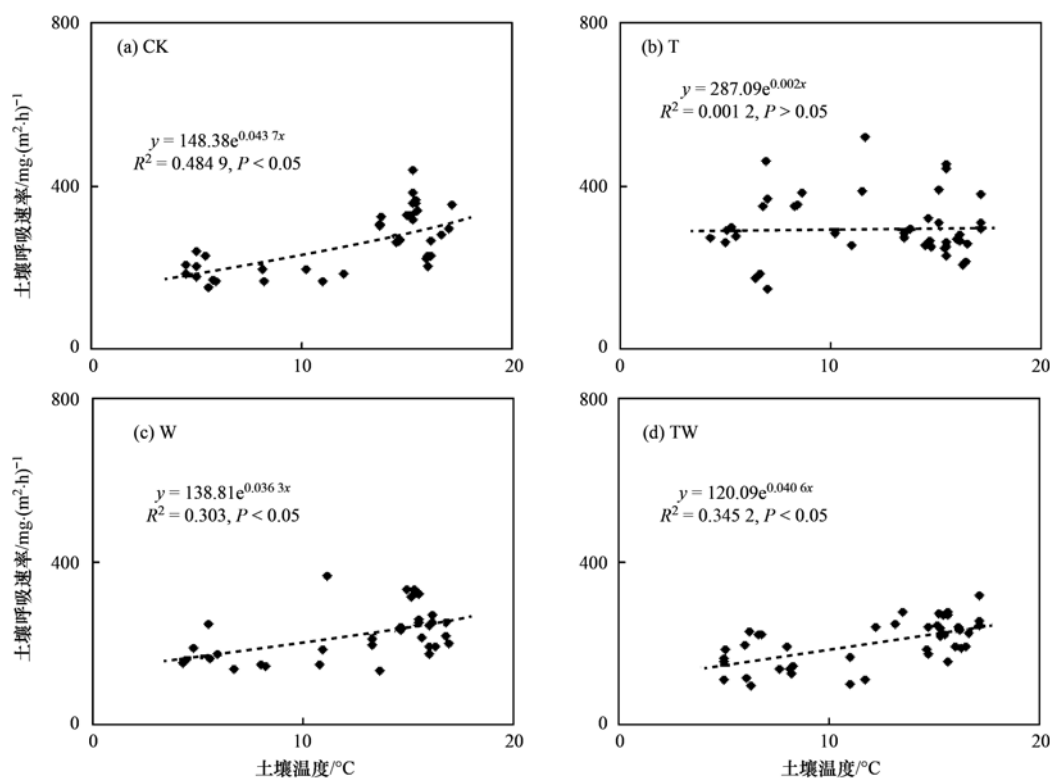


图 7 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 7 Relationship between soil respiration rates and soil temperature

加^[27]。石福孙等^[28]研究表明,增温可能会导致地下生物量降低。本研究结果表明,T和TW处理在拔节-孕穗期以及收获时显著增加了冬小麦地上生物量;而W对冬小麦地上生物量无显著影响。与CK相比,T、W和TW处理均没有显著改变地下生物量。入冬后,气温降低土壤冻结,冬小麦停止生长(本试验中的CK和W处理),但增温处理(T和TW处理)可使冬小麦继续生长,因而会对冬小麦的物

和TW的土壤呼吸速率和土壤温度呈一定的正比关系,总体趋势是随着土壤温度升高而升高。CK、T、W和TW的土壤呼吸温度敏感性系数(Q_{10})分别为1.55、1.02、1.44和1.50,相比于CK、T、W和TW的土壤呼吸 Q_{10} 值均有一定的降低,特别是T的 Q_{10} 降低比较明显。

3 讨论

3.1 生物量

生物量对评价生态系统有着至关重要的作用,有研究表明,气温升高会使植物的生长速率加快,增强植物的光合作用和水分利用率等,有利于干物质的积累,土壤温度的升高会促进微生物的分解进程从而使植物对营养物质的吸收增强,导致生物量增

候期产生显著影响^[29,30],生长期延长,生物量增加。减少降水可使土壤湿度降低,冬小麦生长中会受一定的水分胁迫,从而导致生物量降低。但由于本试验是在南京地区开展,南京全年降水较为充足,降水减少30%并不能对冬小麦生长产生显著的影响,所以相比于CK,W处理对生物量的影响不显著。

3.2 土壤呼吸

土壤呼吸主要是植物根系呼吸和土壤微生物呼

吸,增温和降水变化会通过影响植物根系和土壤微生物群落的组成,进而影响土壤呼吸速率. Iqbal 等^[31]对不同土地类型研究表明,影响土壤呼吸的关键因子是土壤温度. Shi 等^[32]对农田土壤呼吸研究表明,土壤温度和作物物候是主要控制因子. 温度升高可以增强土壤微生物的活性,有机质的分解速率加快^[33],从而导致土壤微生物呼吸增加. 多数研究表明,土壤呼吸在一定范围内随着温度的上升而升高,土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子,而当土壤湿度成为限制因子时,土壤湿度会取代土壤温度成为短暂的控制因子^[34]. 而土壤含水量对土壤呼吸的影响较为复杂,当其他因子处于正常且土壤水分处于最大田间持水量时,土壤呼吸量最大,当土壤水分过低或过高时,土壤呼吸都会被抑制^[35]. 土壤水分主要是通过影响土壤孔隙、CO₂的扩散和土壤微生物的活动及数量等因素从而对土壤呼吸产生影响. 可以看出,土壤温度和土壤湿度单因子与土壤呼吸之间存在着一定的相关关系,并且两个因子也存在着相互作用. 因此,选择土壤温度(X_1)和土壤湿度(X_2)为自变量因子,土壤呼吸(Y)为因变量,对本研究的土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度做逐步回归分析,结果表明,T在一定程度上增加了冬小麦土壤呼吸速率,尤其是在分蘖-返青期增幅最大,对土壤增温明显,T逐步回归分析发现,土壤温度和土壤湿度皆被剔除,即T改变了土壤呼吸与土壤温湿度之间的关系,小麦主要生长季T平均土壤湿度相比于CK低6.5%(图1),T对土壤呼吸的影响不仅体现在增温本身的效应,而且通过影响土壤水分间接影响土壤呼吸速率. W一定程度上降低了土壤呼吸,但并不明显. 原因可能是南京降水量较为充足,降水减少30%并没有使土壤湿度成为冬小麦生长的限制因子,逐步回归分析也表明W土壤湿度不是土壤呼吸的主要驱动因子,因此对冬小麦地上和根系生物量的影响也不明显,没有显著影响根系生长和土壤微生物的数量及活性. TW土壤呼吸在整个生育期均低于CK,可能是因为降水量减少了30%,再加上昼夜持续增温,加快了土壤植株系统的蒸散,降低了植株和土壤微生物的水分利用率,通过逐步回归分析发现,土壤湿度对土壤呼吸的相关系数 $R=0.522(P=0.009)$,土壤温度对土壤呼吸的相关系数 $R=0.258(P=0.113)$,表明TW土壤湿度对土壤呼吸的影响大于土壤温度的影响,水分条件成为TW土壤呼吸的重要影响因子^[36],从而可能导致TW土壤呼吸速率降低.

3.3 土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})

刘艳等^[37]发现增温促进了冬小麦和大豆田土壤CO₂产生速率,Luo等^[38]对美国大草原生态系统增温研究发现,增温2℃降低了土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}). 本研究结果亦表明,在冬小麦生长季,相比于CK,T促进了土壤呼吸,T、W和TW均在一定程度上降低了土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}),其中T处理的 Q_{10} 降低比较明显. 可能原因增温能增加土壤呼吸速率,随着土壤温度的升高,根系和土壤微生物活性逐渐升高,当升高到某个阈值时,其他因子如土壤水分等可能成为限制因子,从而导致土壤呼吸对温度产生适应现象,相应的也就使土壤呼吸对土壤温度变化的敏感性降低,并且本研究计算冬小麦 Q_{10} 时包含了冬季土壤温度较低的阶段,在一定程度上使得 Q_{10} 降低. 土壤湿度与 Q_{10} 的关系一般是在达到最优含水量(Q_{10} 达到最大时的土壤体积含水量)状态之前, Q_{10} 随着土壤湿度的增大而增大,此最优含水量可能在20%~25%(体积含水量)范围内^[39]. 但本研究试验地区南京全年降水量较为充足,30%的降水减少对 Q_{10} 的影响不显著,也没有限制冬小麦的生长,对根系生长和土壤微生物的数量及活性影响不大,W没有显著影响土壤呼吸. 相对与CK来说,TW处理的30%降水减少在一定程度上抑制了增温的效应,导致 Q_{10} 值变化并不大.

4 结论

(1) 增温在拔节-孕穗期显著增加了冬小麦地上生物量和总生物量,水分减少与增温复合处理在拔节-孕穗期显著增加了冬小麦地上生物量. 收获时,增温处理显著增加了冬小麦地上生物量,水分减少与增温复合处理显著增加了冬小麦地上生物量和总生物量.

(2) 降水减少和增温处理以及两者的复合处理都没有改变土壤呼吸的生长季变化规律,水分减少30%与增温复合处理显著降低了土壤呼吸平均速率和土壤CO₂累积排放量.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, et al (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 2013.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,

- 2006, **2**(1): 3-8.
- [3] Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, *et al.* Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24**(6): 954-971.
- [4] Ma Z G, Fu C B. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(23): 2913-2925.
- [5] Chen H P. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(12): 1462-1472.
- [6] 钟军, 苏布达, 翟建青, 等. 中国日降水的分布特征和未来变化[J]. *气候变化研究进展*, 2013, **9**(2): 89-95.
- [7] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. *气象与环境科学*, 2015, **38**(1): 80-94.
- [8] Liu L L, Wang E L, Zhu Y, *et al.* Contrasting effects of warming and autonomous breeding on single-rice productivity in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **149**: 20-29.
- [9] Tian Y L, Chen J, Chen C Q, *et al.* Warming impacts on winter wheat phenophase and grain yield under field conditions in Yangtze Delta Plain, China [J]. *Field Crops Research*, 2012, **134**: 193-199.
- [10] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields [J]. *Science*, 2003, **299**(5609): 1032.
- [11] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, *et al.* Rice yields decline with higher night temperature from global warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**(27): 9971-9975.
- [12] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(8): 1489-1489.
- [13] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 增温对华北冬小麦生产影响的试验研究[J]. *气象学报*, 2012, **70**(4): 902-908.
- [14] Zhang N L, Xia J Y, Yu X J, *et al.* Soil microbial community changes and their linkages with ecosystem carbon exchange under asymmetrically diurnal warming [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2053-2059.
- [15] 张明乾, 韩证仿, 陈金, 等. 夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(11): 1464-1470.
- [16] Jalota S K, Sood A, Chahal G B S, *et al.* Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **84**(1-2): 137-146.
- [17] 余卫东, 赵国强, 陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. *中国农业气象*, 2007, **28**(1): 9-12.
- [18] 刘涛, 张永贤, 许振柱, 等. 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(10): 1043-1053.
- [19] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(1): 161-170.
- [20] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 67-75.
- [21] Zhou G S, Jia B R, Han G X, *et al.* Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR) [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, **51**(3): 254-262.
- [22] Högy P, Poll C, Marhan S, *et al.* Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley [J]. *Food Chemistry*, 2013, **136**(3-4): 1470-1477.
- [23] Wan S Q, Hui D F, Wallace L, *et al.* Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): 93-114.
- [24] 程徐冰, 吴军, 韩士杰, 等. 降水减少对长白山蒙古栎叶片生理生态特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(9): 1908-1914.
- [25] Zelikova T J, Housman D C, Grote E E, *et al.* Warming and increased precipitation frequency on the Colorado Plateau: implications for biological soil crusts and soil processes [J]. *Plant and Soil*, 2012, **355**(1-2): 265-282.
- [26] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [27] 胡正华, 周迎平, 崔海玲, 等. 昼夜增温对大豆田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2961-2967.
- [28] 石福孙, 吴宁, 罗鹏. 川西北亚高山草甸植物群落结构及生物量对温度升高的响应 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5286-5293.
- [29] 车少静, 智利辉, 冯立辉. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策[J]. *中国农业气象*, 2005, **26**(3): 180-183.
- [30] Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, *et al.* Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**(8-9): 1242-1251.
- [31] Iqbal J, Hu R G, Du L J, *et al.* Differences in soil CO₂ flux between different land use types in mid-subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(9): 2324-2333.
- [32] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, *et al.* Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**(3-4): 220-233.
- [33] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1693-1700.
- [34] 张勇, 陈书涛, 王连喜, 等. 臭氧浓度升高对冬小麦田土壤呼吸, 硝化和反硝化作用的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2988-2994.
- [35] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机

- 理[J]. 生态学报, 2003, **23**(5): 972-978.
- [36] 刘艳, 陈书涛, 刘燕, 等. 增温对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(4): 674-679.
- [37] 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 等. 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4205-4211.
- [38] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 622-625.
- [39] 陈书涛, 张勇, 胡正华, 等. 臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1476-1483.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2015年10月21日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2014年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示2014年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.00,排名第一,总被引频次7733,影响因子1.294.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2014年度《环境科学》综合评价总分76.00,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行