

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序 ..... 陈卫平(4069)  
再生水灌溉利用的生态风险研究进展 ..... 陈卫平,张炜铃,潘能,焦文涛(4070)  
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 ..... 潘能,侯振安,陈卫平,焦文涛,彭驰,刘文(4081)  
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 ..... 潘能,陈卫平,焦文涛,赵忠明,侯振安(4088)  
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 ..... 赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥(4094)  
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 ..... 吕斯丹,陈卫平,王美娥(4100)  
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 ..... 吕斯丹,陈卫平,王美娥(4108)  
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 ..... 赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥(4115)  
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 ..... 王美娥,陈卫平,焦文涛(4121)  
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 ..... 王巧环,陈卫平,王效科,任玉芬,张烨(4127)  
北京市再生水的公众认知度评估 ..... 张炜铃,陈卫平,焦文涛(4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 ..... 陈鹏飞,张蕾,权建农,高扬,黄梦宇(4141)  
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究 ..... 王红丽,陈长虹,黄海英,王倩,陈宜然,黄成,李莉,张钢锋,陈明华,楼晟荣,乔利平(4151)  
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 ..... 张军科,王跃思,吴方堃,孙杰(4159)  
区域大气环境风险源识别与危险性评估 ..... 张晓春,陈卫平,马春,詹水芬,焦文涛(4167)  
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 ..... 刘刚,孙丽娜,李久海,徐慧(4173)  
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 ..... 胡志远,李金,谭丕强,楼狄明(4181)  
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 ..... 隆茜,周菊珍,孟颖,达良俊(4188)  
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 ..... 杨平,仝川,何清华,黄佳芳(4194)  
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 刘艳,陈书涛,胡正华,任景全,沈小帅(4205)  
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 ..... 孔祥胜,祁士华,孙莺,黄保健(4212)  
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 ..... 马万里,刘丽艳,齐虹,白杨,刘吉敏,陈忠林,李一凡(4220)  
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 ..... 周婕成,陈振楼,毕春娟,吕金刚,许世远,潘琪(4226)  
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 ..... 周婕成,毕春娟,陈振楼,王璐,许世远,潘琪(4237)  
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 ..... 武江越,刘征涛,周俊丽,高富(4244)  
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 ..... 裴芳,罗泽娇,彭进进,祁士华(4251)  
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 ..... 刘庚,郭观林,南锋,魏文侠,李发生,毕如田(4256)  
太原市市灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 ..... 廖小平,张彩香,赵旭,向青清,李佳乐(4263)  
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 ..... 吕金刚,毕春娟,陈振楼,周婕成,韩景超(4270)  
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 ..... 李瑞利,柴民伟,邱国玉,贺蓓(4276)  
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 ..... 张伟,张洪,单保庆(4284)  
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 ..... 秦延文,张雷,郑丙辉,曹伟(4291)  
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 ..... 朱国锋,蒲焘,何元庆,王培震,孔建龙,张宁宁,辛惠娟(4300)  
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 ..... 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,毛志刚,高华梅,孙明波(4307)  
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 ..... 沈清清,彭谦,赖泳红,纪开燕,韩秀林(4316)  
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 ..... 肖萍,肖峰,赵锦辉,秦潼,王东升,冯金荣,许光(4322)  
水体中甲基汞光化学降解特征研究 ..... 孙荣国,毛雯,马明,张成,王定勇(4329)  
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 ..... 李时银,李小荣,朱怡苹,朱江鹏,王国祥(4335)  
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究 ..... 陈超,赵倩,封莉,张立秋(4340)  
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 ..... 王夏琳,李睿华(4346)  
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 ..... 郭磊,贾永刚,付腾飞,刘晓磊,赵战坤(4352)  
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 ..... 谢杰,王哲,吴德意,李春杰(4361)  
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 ..... 季军远,邢雅娟,郑平(4367)  
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 ..... 王振,刘超翔,李鹏宇,董健,刘琳,朱葛夫(4373)  
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氨水处理 ..... 庆承松,鲍韬,陈天虎,陈冬,谢晶晶(4380)  
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 ..... 钟晨宇,叶杰旭,李若愚,陈胜,孙德智(4387)  
水平电场作用下活性污泥的脱水研究 ..... 季雪元,王毅力,冯晶(4393)  
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中的降解的影响 ..... 宋宁慧,单正军,石利利,郭敏,许静,孔德洋(4400)  
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 ..... 陈广银,郑正,常志州,王海芹,叶小梅(4406)  
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 ..... 王兴润,农泽喜,王琪(4412)  
国家大气污染物排放标准体系研究 ..... 江梅,张国宁,张明慧,邹兰,魏玉霞,任春(4417)  
环境基准向环境标准转化的机制探讨 ..... 毕岑岑,王铁宇,吕永龙(4422)  
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 ..... 傅国伟(4428)  
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 ..... (4434)  
《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

# 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响

刘艳<sup>1,2</sup>, 陈书涛<sup>1,2\*</sup>, 胡正华<sup>1,2</sup>, 任景全<sup>1</sup>, 沈小帅<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

**摘要:** 为研究模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响, 设置了随机试验, 观测增温和对照处理的农田土壤呼吸速率. 采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统对农田土壤呼吸速率进行观测, 并采用气压过程分离技术 (BaPS) 测定土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率. 在观测土壤呼吸速率的同时, 观测了两处理的土壤温度、湿度. 结果表明, 不同增温处理下土壤呼吸速率的季节变异趋势基本一致, 其季节变异与土壤温度的变异具有一致性. 冬小麦田增温和对照处理的平均土壤呼吸速率分别为  $(3.54 \pm 0.60) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  和  $(2.49 \pm 0.53) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 大豆田增温和对照处理平均土壤呼吸速率分别为  $(4.80 \pm 0.46) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  和  $(4.14 \pm 0.29) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ . 模拟增温显著促进了冬小麦田和大豆田的土壤呼吸作用, 在冬小麦生长期 (抽穗-成熟期) 增温和对照处理的土壤呼吸速率差异最为明显 ( $P < 0.05$ ); 在大豆开花-结荚期以及鼓粒-成熟期增温与对照的土壤呼吸速率分别存在极显著性 ( $P < 0.01$ ) 和显著性 ( $P < 0.05$ ) 差异. 进一步的研究表明, 模拟增温和对照处理土壤呼吸均与土壤温度存在极显著 ( $P < 0.01$ ) 的指数回归关系, 但增温处理的土壤呼吸的温度敏感性明显高于对照, 小麦生长期增温和对照处理的土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 1.83 和 1.26, 大豆生长期两处理的土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 2.85 和 1.70. 本研究表明, 增温显著促进了农田土壤呼吸作用.

**关键词:** 模拟增温; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度; 农田

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4205-07

## Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation

LIU Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Shu-tao<sup>1,2</sup>, HU Zheng-hua<sup>1,2</sup>, REN Jing-quan<sup>1</sup>, SHEN Xiao-shuai<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** This study was aimed to investigate the effects of simulated warming on soil respiration in a cropland under winter wheat-soybean rotation. Randomized experiments were carried out in the cropland. 6 Plots were arranged and there were 2 treatments, simulated warming and control. A portable soil CO<sub>2</sub> fluxes system (LI-8100) was used to measure soil respiration rates. Soil CO<sub>2</sub> production rates were determined by using a Barometric Process Separation (BaPS) method. Soil temperature and soil moisture were simultaneously determined when measuring soil respiration rates. Results indicated that soil respiration rates in different treatments showed similar seasonal variability, in accordance with the variability in soil temperature. Seasonal mean soil respiration rates for simulated warming and control treatments were 3.54 and 2.49  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , respectively, during the winter wheat growth season, while they were 4.80 and 4.14  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , respectively, during the soybean growth season. Simulated warming significantly ( $P < 0.05$ ) enhanced soil respiration during both the winter wheat and soybean growth seasons. The impact of simulated warming on soil respiration was particularly obvious during the later growth stages of winter wheat (from heading to maturity stages) and soybean (from flowing to maturity stages). Further investigations suggested that, for both the winter wheat and soybean growth seasons, the relationship between soil respiration and soil temperature could be well explained ( $P < 0.01$ ) by exponential functions. The temperature sensitivity ( $Q_{10}$ ) of soil respiration in the simulated warming treatments was significantly higher than that in the control treatments. The  $Q_{10}$  values for the simulated warming and control treatments were 1.83 and 1.26, respectively, during the winter wheat growth season, while they were 2.85 and 1.70, respectively, during the soybean growth season. This study showed that simulated warming significantly increased soil respiration in the cropland.

**Key words:** simulated warming; soil respiration; soil temperature; soil moisture; cropland

观测表明, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度已从工业革命 (1750 年) 的约 280  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$  增长到 2005 年的约 379  $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而在大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高的同时, 过去 100 多年间全球地表平均温度上升了约 0.6°C<sup>[1,2]</sup>. 全球变暖对生态系统具有重要影响, 通过增温试验来

收稿日期: 2012-02-10; 修订日期: 2012-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41005088, 41175136)

作者简介: 刘艳 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳氮循环与气候变化, E-mail: liuyan19850205@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn

研究未来气候变暖情形下生态系统物质循环和能量流动的规律具有重要意义。

土壤呼吸(即土壤 CO<sub>2</sub> 排放)是全球碳循环中一个重要过程,全球每年因土壤呼吸作用向大气中释放的碳的估算值约为 75~120 Pg<sup>[3]</sup>,其量值仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值<sup>[4]</sup>。对于农田生态系统而言,农田土壤有机碳含量的增减是特定农田生态系统成为碳源或碳汇的标志,而土壤呼吸则是有机碳含量长期变化状况的重要短期表征因子。土壤呼吸通常被划分为自养呼吸(根呼吸)和异养呼吸(微生物呼吸)两个组分,土壤 CO<sub>2</sub> 的产生过程主要与土壤微生物和植物生理生长过程有关<sup>[4]</sup>。增温对土壤呼吸的影响规律及其机制是增温对生态系统碳循环过程影响研究中的热点。研究表明,一方面,增温会增大植物光合速率,使其净初级生产量增加<sup>[5]</sup>,从而会促进根呼吸作用并增加根际分泌物向土壤的输送<sup>[6]</sup>;另一方面,温度升高本身会促进土壤微生物呼吸和根呼吸<sup>[7]</sup>。在草地、苔原、森林生态系统进行的一些增温试验表明,增温促进了土壤呼吸作用<sup>[8,9]</sup>,最近的研究表明,增温对于草地土壤呼吸的促进作用主要体现在夜间这一时段<sup>[10]</sup>。Rustad 等<sup>[8]</sup>通过对增温试验的结果进行大样本数据分析后指出,平均而言,土壤增温 0~6℃ 可使土壤呼吸增加 20%。但也有学者认为,增温虽然在短期内可促进土壤呼吸作用,但在较长的时间尺度内,则无明显促进作用,并且土壤呼吸对温度的敏感性随温度的升高而降低<sup>[11,12]</sup>。以往的这些关于增温影响土壤呼吸的研究结果存在较大的不确定性,特别是尚不多见类似在草地或森林生态系统进行的准确设计的增温试验<sup>[12]</sup>,来研究增温和对照处理的农田土壤呼吸的差异。

本研究通过观测冬小麦-大豆轮作农田模拟增温和对照处理土壤呼吸的季节变化,分析了增温对农田土壤呼吸的影响规律,以期了解未来气候变暖对土壤碳循环的影响规律提供基础数据和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点概况

观测地点位于南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N, 118.86°E)试验田,于 2011 年 3~10 月在该试验田进行冬小麦-大豆生长季田间观测试验。该区多年平均气温为 15.6℃,多年平均降水量为 1100 mm。供试土壤为潜育型水稻土(灰马肝土

属),土壤质地为壤质黏土,耕层土壤黏粒含量为 26.1%,土壤 pH(H<sub>2</sub>O) 值为 6.3,有机碳和全氮的含量分别为 19.4 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.45 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

供试冬小麦品种为扬麦 12 号,于 2010-11-03 播种,在冬小麦生长季返青后进行模拟增温处理。供试大豆品种为八月白,于 2011-07-01 播种,在大豆生长季出苗后进行模拟增温处理。作物主要生育期见表 1。由于土壤呼吸包括根呼吸和土壤微生物的呼吸作用两部分,冬小麦越冬前和大豆出苗前作物根生物量相对较小,此时的土壤呼吸中作物根系的影响相对不明显,此时土壤微生物呼吸作用占主导地位,因此在试验中进行增温的时段为冬小麦和大豆的主要生育期,在冬小麦返青和出苗后,作物生长相对较快,增温对作物根呼吸作用的影响效应比较明显。

表 1 冬小麦、大豆主要生育期

冬小麦		大豆	
日期	生育期	日期	生育期
2010-11-03	播种	2011-07-01	播种
2010-12-28	出苗	2011-07-04	出苗
2011-02-04	返青	2011-07-25	三叶
2011-03-17	拔节	2011-07-31	分枝
2011-04-09	孕穗	2011-08-20	开花
2011-04-17	抽穗	2011-09-03	结荚
2011-04-23	开花	2011-09-15	鼓粒
2011-04-28	灌浆	2011-10-09	成熟
2011-06-01	收割	2011-10-25	收获

采用随机试验,设置增温和对照处理,增温和对照各 3 个重复,共 6 个小区,每个小区面积为 2.5 m × 2.5 m。通过红外辐射加热管对试验小区进行模拟增温,每个小区设置 1 根红外辐射加热管,每天 24 h 通过红外辐射加热管进行不间断增温。每根红外辐射加热管长 1.0 m,功率 1000 W,安装在不锈钢罩之下,不锈钢罩边缘向下倾斜,防止下雨天雨水斜向进入到不锈钢罩内淋湿加热管。对照处理仅有不锈钢罩,无红外辐射加热管。每个加热管均通过供电发热,各自具有独立的电源控制开关,并由漏电保护总开关控制其开启和关闭。加热灯管进行散射加热,经通电加热测试,在 3 个增温装置正面处的温度几乎完全一致,差值 ≤ 0.2℃,各小区大部分区域能达到均一的增温效果,各个重复的温控效果均一、良好,由于边际效应的影响在小区边缘处与小区中间位置处存在一定差异。

### 1.3 土壤呼吸速率测定

预先将直径为 20 cm、高 10 cm 的土壤呼吸底座(PVC)埋入各个小区的土壤中,定期除去底座内的植物,以避免测定土壤呼吸时有植物的呼吸作用干扰. 为减少对被测环境造成影响,在观测土壤呼吸前的一个月将 PVC 测量圈埋入土壤中,给予足够的时间平衡土壤扰动,从而避免对土壤呼吸观测造成影响. 于每个采样日的上午进行观测,采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统(LI-COR 公司,美国)对不同增温处理的土壤呼吸速率测定,观测频率为每周 1~2 次.

从 3~10 月,每个月采用气压过程分离(BaPS)法,分别测定增温和对照这两个处理(每个处理相应进行 3 个重复)的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率. 以直径 6.0 cm、高 4.3 cm 的不锈钢环刀取土壤样品,在每个小区中采集 6 个土壤样品作为重复,采后立即用保鲜膜密封环刀,防止水分散失,并迅速送到实验室在 BaPS 系统中进行分析. 每次分析将 6 个土壤样品放入到 BaPS 系统中测定土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率,测定结果为 6 个土壤样品的平均值,其含义为每 kg 土壤每 h 产生的以 CO<sub>2</sub> 形式释放的碳的量. 土壤中 CO<sub>2</sub> 产生速率的大小直接影响土壤表面 CO<sub>2</sub> 排放量(土壤呼吸)的多少,因此,测定土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率可为研究增温对土壤呼吸的影响效应提供佐证.

#### 1.4 环境因子测定

每次测定土壤呼吸速率的同时测定试验地点空

气温度、5 cm 深土壤温度和湿度(体积含水量).

#### 1.5 数据分析

利用 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析,分析不同模拟增温处理的平均土壤呼吸速率差异,以及不同处理间土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率的差异显著性. 利用 EXCEL 2003 制作土壤呼吸与土壤温度的回归关系图.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸动态变化

冬小麦田增温处理土壤温度介于 18.1~37.2℃之间,对照处理介于 12.4~28.7℃之间;大豆田增温处理土壤温度在 18.0~30.0℃范围内,对照处理土壤温度在 15.8~28.0℃范围内[图 1(a)]. 在冬小麦-大豆轮作阶段增温处理比对照平均土壤温度高 4.9℃. 冬小麦增温处理的土壤湿度变异范围为 2.0%~15.0%,对照处理为 2.0%~28.0%;而大豆田增温处理的土壤湿度变异范围为 8.0%~32.0%,对照处理为 9.0%~30.0%,4 月和 9 月的土壤湿度相对较低[图 1(b)]. 在整个冬小麦-大豆轮作生长季,大豆田的土壤湿度明显高于小麦田,这与大豆生长季降雨量相对更高有关. 在大豆生长的 7~10 月,当地降雨极为频繁,总降雨量达 777 mm,大大高于多年均值 459 mm,其中 7、8 月总降雨日数为 46 d. 大豆生长季频繁的降雨不仅导致增温效果不明显,而且使对照小区的温度也偏低.

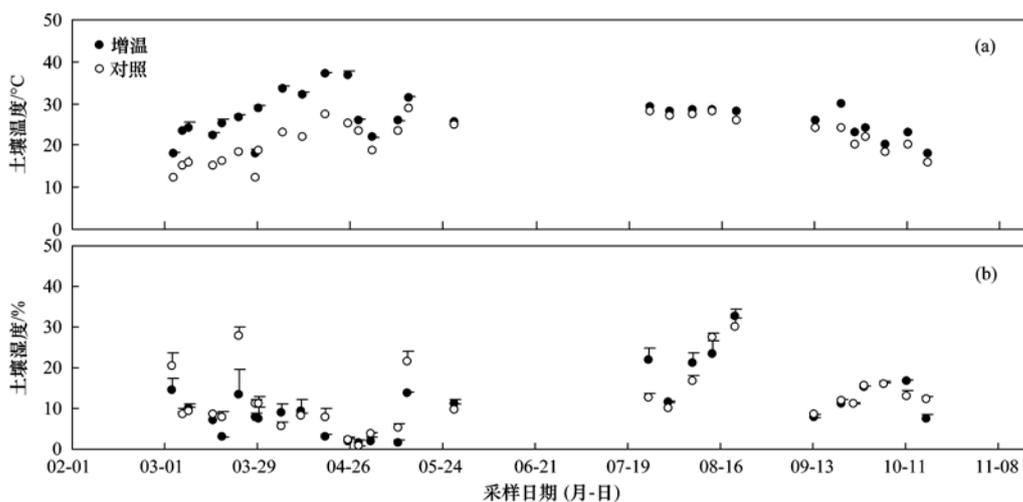


图 1 土壤温度、土壤湿度动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil water content and soil temperature

冬小麦增温和对照处理的土壤呼吸速率的变异范围分别为 0.97~7.24  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  和 1.69~4.45  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ; 大豆增温和对照处理的土壤呼吸速率的变异范围分别为 1.94~10.27 和 2.40

~6.00  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  (图 2). 冬小麦-大豆增温和对照处理的土壤呼吸速率的季节变异趋势与土壤温度的变异趋势基本一致. 虽然土壤呼吸的季节变异趋势总体上受土壤温度控制,但当土壤水分成为肋

迫因子时湿度可能取代温度而成为土壤呼吸的短期控制因子<sup>[17, 18]</sup>.

方差分析表明,在小麦返青期增温与对照处理间土壤呼吸速率有边际显著差异( $P < 0.1$ ),在小麦拔节-孕穗期无差异,在小麦抽穗-成熟期有显著性差异( $P < 0.05$ );在大豆分枝期两处理间土壤呼吸速率无差异( $P > 0.1$ ),而在开花-结荚期和成熟期均有显著性差异( $P < 0.01$ )(表2).冬小麦田增温和对照处理的平均土壤呼吸速率分别为 $(3.54 \pm 0.60) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $(2.49 \pm 0.53) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,大豆田增温和对照处理的平均土壤呼吸速率分别为 $(4.80 \pm 0.46) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $(4.14 \pm 0.29) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ .若以冬小麦-大豆轮作计,增温和对照处理的平均土壤呼吸速率分别为 $(4.17 \pm 0.53) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $(3.32 \pm 0.41) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ .

表2 模拟增温和对照处理平均土壤呼吸速率<sup>1)</sup>

Table 2 Mean soil respiration rates in simulated warming and control treatments

处理	小麦/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$		处理	大豆/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	
	增温	对照		增温	对照
返青	1.24 ± 0.17 (a)	1.87 ± 0.22 (M)	分枝	5.86 ± 0.59 (a)	4.92 ± 0.36 (a)
拔节-孕穗	2.12 ± 0.38 (a)	2.29 ± 0.35 (a)	开花-结荚	4.09 ± 0.42 (a)	5.01 ± 0.31 (b)
抽穗-成熟	5.56 ± 0.65 (a)	3.03 ± 0.40 (b)	鼓粒-成熟	4.34 ± 0.41 (a)	3.33 ± 0.29 (b)
全生育期	3.54 ± 0.60 (a)	2.49 ± 0.53 (M)	全生育期	4.80 ± 0.46 (a)	4.14 ± 0.29 (b)

1)表中各生长季每行中括号内包含相同字母表示处理间无显著差异( $P > 0.05$ ),不包含相同字母表示处理间存在极显著差异( $P < 0.05$ ); M表示存在边际显著差异

基于 BaPS 的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率测定表明,小麦生长季,05-13 测定的增温和对照处理的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率均值分别为 $(132.6 \pm 4.5) \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(147.90 \pm 3.4) \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ;大豆生长季,增温和对照处理的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率均值分别为 $(155.4 \pm 24.7) \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(103.3 \pm 14.4) \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ .如图3所示,大豆田土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率明显高于小麦田,模拟增温对冬小麦田土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率无显著影响,但促进了大豆田土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率(08-16 和 10-11 增温和对照处理间土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率存在显著差异).

综合田间观测的土壤呼吸速率和基于 BaPS 测定的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率来看,两者在增温处理小区的量值均大于在对照小区的量值.在增温和对照处理中,与4个土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率测定时段对应的田间土壤呼吸速率的均值分别为 $5.39 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $4.41 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,前者比后者高22%,4个土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率均值分别为 $149.7 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $128.5 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ,前者比

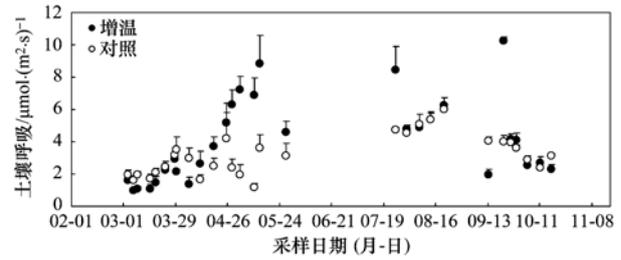


图2 土壤呼吸动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil respiration

$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,在整个轮作周期内,增温比对照处理平均土壤呼吸速率高25.6%.

方差分析结果表明,小麦整个生育期两处理间平均土壤呼吸速率有差异( $P < 0.1$ ),大豆整个生育期两处理间平均土壤呼吸速率有极显著性差异( $P < 0.01$ ),若以冬小麦-大豆轮作计,整个生育期有显著性差异( $P < 0.05$ )(表2).

后者高17%,由此可见,测定的土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率和土壤呼吸速率具有一致性,增温条件下土壤呼吸速率的提高与其土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率提高有关.

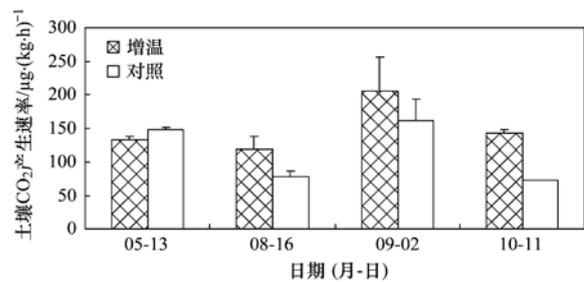


图3 土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率的变化

Fig. 3 Changes in soil CO<sub>2</sub> production rates

方差分析表明,测定的增温和对照之间的小麦根生物量、地上部分生物量和产量均无显著差异,大豆田增温和对照之间的3个指标也均无显著差异(表3).同时也注意到,增温处理下小麦根生物量、地上部分生物量和产量高于对照,在大豆生长季则有相反的规律,这可能与气象条件有关.4月下旬到5月中旬本研究地点经历了严重干旱,

土壤湿度一直处于 5% 以下, 而增温更加剧了土壤水分散失, 导致增温处理下麦田遭受水分胁迫 [图 1(b)], 从而抑制了生物量积累和产量形成过程;

而大豆生长季的降雨又极为频繁, 土壤水分充沛 [图 1(b)], 在增温条件下更有利于生物量和产量的增加。

表 3 收获的作物生物量和产量<sup>1)</sup>

Table 3 Harvested crop biomass and yield

处理	小麦/g·m <sup>-2</sup>			大豆/g·m <sup>-2</sup>		
	根生物量	地上生物量	产量	根生物量	地上生物量	产量
增温	41.4 ± 9.8 (a)	213.2 ± 37.5 (a)	184.7 ± 36.1 (a)	55.0 ± 3.2 (a)	1 011.5 ± 87.7 (a)	351.5 ± 49.3 (a)
对照	68.1 ± 8.5 (a)	332.6 ± 42.8 (a)	277.0 ± 20.6 (a)	50.5 ± 3.9 (a)	829.8 ± 29.4 (a)	258.5 ± 4.9 (a)

1) 表中每列中括号内包含相同字母表示处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )

### 2.2 土壤呼吸各组分的温度敏感性

对土壤呼吸速率与土壤温度进行一元指数回归分析, 可得 05-10 测定的数据点为统计意义上的“离群点”, 这与当日极低的土壤湿度造成了水分胁迫有关, 故在剔除该“离群点”的基础上再进行回归分析. 结果表明, 小麦生长季, 增温和对照处理的指数回归方程可分别解释土壤呼吸 69% 和 35% 的变异

[图 4(a)],  $P$  值均达到显著 ( $p < 0.05$ ) 或极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 大豆生长季, 增温和对照处理的指数回归方程可分别解释土壤呼吸 60% 和 67% 的变异 [图 4(b)],  $P$  值均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ); 小麦-大豆轮作生长季, 增温和对照处理的指数回归方程可分别解释土壤呼吸 69% 和 58% 的变异 [图 4(c)],  $P$  值均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ).

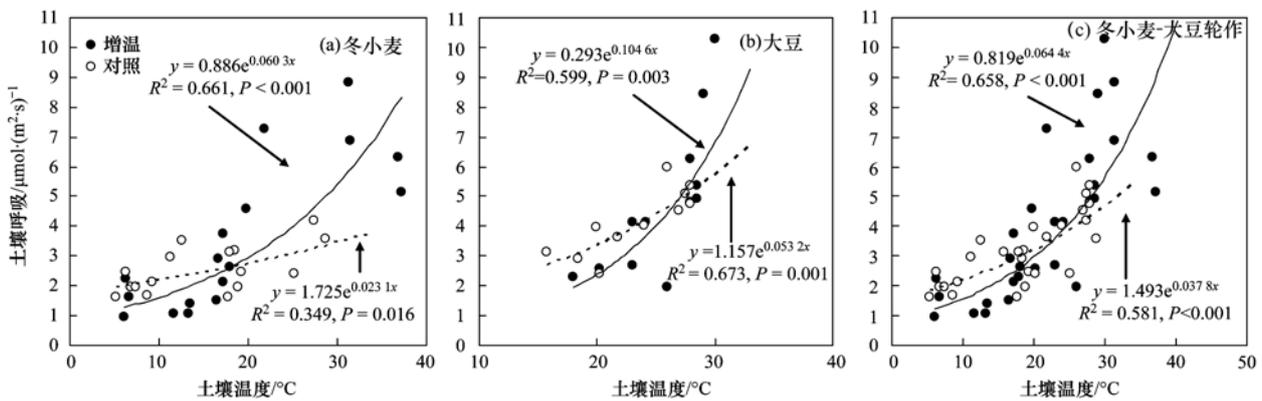


图 4 农田土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 4 Relationship between croplands soil respiration and soil temperature

根据指数回归方程估算, 小麦生长季增温和对照处理的土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 1.83 和 1.26, 大豆生长季两处理的土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 2.85 和 1.70, 冬小麦-大豆轮作生长季增温和对照处理的土壤呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 1.90 和 1.46 (图 5), 由图 5 可见, 增温处理的  $Q_{10}$  明显高于对照处理。

### 3 讨论

#### 3.1 温度对土壤呼吸的影响

Qi 等<sup>[13]</sup> 在加利福尼亚针对森林系统的观测结果表明, 温度可以解释土壤中的  $\text{CO}_2$  排放速率变化的 82%. Bergner 等<sup>[14]</sup> 在美国阿拉斯加州的研究表明, 模拟增温促进了土壤呼吸作用. Welker

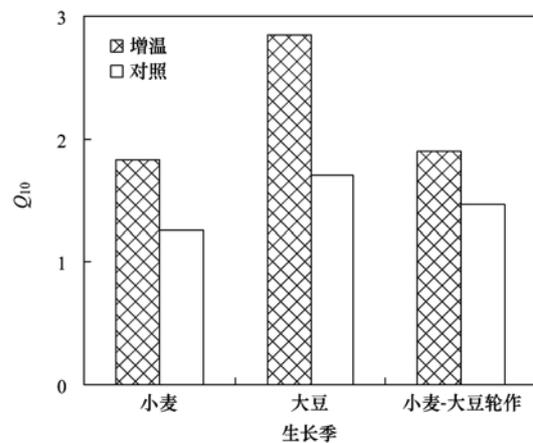


图 5 增温、对照处理的土壤呼吸温度敏感系数 ( $Q_{10}$ )

Fig. 5 Temperature sensitivity ( $Q_{10}$ ) of soil respiration for warming and control treatments

等<sup>[15]</sup>研究表明长时间增温可以增加北极高纬度地区苔原生态系统的 CO<sub>2</sub> 的交换,但夏天某些地区会减少. Niu 等<sup>[16]</sup>在中国内蒙古多伦针对草地系统观测结果表明增温试验降低了土壤中 CO<sub>2</sub> 的交换. Certini 等<sup>[17]</sup>发现土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率在 10 月最高,1 月最低,温度为影响其排放的主要因素. 本研究表明,随着增温时间的增加,大豆生长季增

温和对照处理土壤呼吸速率均相应高于小麦生长季,且土壤呼吸速率与土壤温度有很好的正相关性,增温对土壤呼吸作用有一定的促进作用;模拟增温对冬小麦田土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率无显著影响,随着温度的升高,增温处理的土壤呼吸速率高于对照处理,且促进了大豆田土壤 CO<sub>2</sub> 产生速率(表 4).

表 4 模拟增温对土壤呼吸的影响研究比较

Table 4 Comparison of the effects of simulated warming on soil respiration

地点	国家	生态系统类型	时间段(年)	对土壤呼吸的影响	文献
Berkeley	美国	森林	1998 ~ 1999	促进	[13]
Delta Junction	美国	森林	2002 ~ 2007	促进	[14]
Oklahoma	美国	草原	1999 ~ 2000	抑制	[12]
Nunavut	加拿大	苔原	1992 ~ 2001	促进	[15]
多伦	中国	草地	2005 ~ 2006	抑制	[16]
East Florence	意大利	森林	2000 ~ 2001	促进	[17]
Blodgett	美国	森林	1998 ~ 1999	抑制	[18]
四川	中国	草地、林地、旱地	2004 ~ 2005	抑制	[19]
南京	中国	农田	2010 ~ 2011	促进	本研究

### 3.2 增温对土壤温度敏感性 $Q_{10}$ 的影响

以往有研究表明温度升高会降低土壤微生物呼吸的温度敏感性,冬季的  $Q_{10}$  值大于夏季<sup>[12, 18, 19]</sup>,但在本研究中,生长季尺度上增温处理土壤呼吸的温度敏感性高于对照处理,并且大豆观测阶段的  $Q_{10}$  大于小麦阶段. 造成这种现象的原因可能有如下 4 个方面:①增温试验对农田作物代谢可能会产生激发效应,从而提高土壤根呼吸的温度敏感性. ②本研究中计算麦田土壤呼吸  $Q_{10}$  时对应的土壤温度范围与大豆田的土壤温度较为接近,未包含冬季土壤温度较低阶段,同时,大豆作物生物量高于小麦,可能会向下输送更多的光合产物并以根际分泌物形式进入土壤,从而会提高土壤呼吸对温度的响应程度. ③土壤呼吸的  $Q_{10}$  对温度的响应程度可能因特定的土壤或植被条件而异,在农田生态系统可能会呈现出与其他生态系统不同的规律. ④本研究中土壤呼吸的  $Q_{10}$  为考虑了两个生长季作物根生长和根呼吸增大情形下的结果,Boone 等<sup>[20]</sup>发现,根呼吸和根际微生物的温度敏感性比土壤微生物呼吸更明显,根呼吸和根际微生物呼吸对总土壤呼吸的大小具有重要贡献. 在植物生物量随温度升高而增大的条件下,根呼吸也会随温度升高而增强<sup>[21~23]</sup>,增温处理的土壤呼吸温度敏感性则相对更大一些.

由于本研究是探讨增温对农田生态系统土壤呼吸影响的初步结果,两个生长季的田间试验仍不能从根本上阐明其影响机制,今后须进行更长时间的

观测试验,并研究根呼吸和微生物呼吸对增温的响应规律,以更深入地研究增温对土壤呼吸的影响效应和内在机制.

## 4 结论

(1)模拟增温处理显著促进了冬小麦-大豆田的土壤呼吸作用,在冬小麦和大豆生长季,增温处理比对照平均土壤呼吸速率分别高 29.3% 和 15.9%,在作物生长后期增温对土壤呼吸的促进作用更明显.

(2)土壤温度是影响冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸季节变异的关键因子,土壤呼吸速率随土壤温度的升高而呈指数形式增加.

致谢:感谢南京信息工程大学的张寒、李兴阳在野外样品采集和分析中给予的帮助.

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis, summary for policymakers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, et al. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems [J]. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 29-70.
- [4] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-89.
- [5] Peñuelas J, Gordon C, Llorens L, et al. Noninvasive field

- experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a north-south European gradient[J]. *Ecosystems*, 2004, **7**(6): 598-612.
- [ 6 ] Kuzyakov Y. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [ 7 ] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, **411**(6839): 789-792.
- [ 8 ] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, *et al.* A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming [J]. *Oecologia*, 2001, **126**(10): 543-562.
- [ 9 ] 潘新丽, 林波, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(8): 1637-1643.
- [ 10 ] Xia J Y, Han Y, Zhang Z, *et al.* Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe[J]. *Biogeosciences*, 2009, **6**(8): 1361-1370.
- [ 11 ] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B, *et al.* Acclimation of respiration to temperature and CO<sub>2</sub> in seedlings of boreal tree species in relation to plant size and relative growth rate [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(6): 679-691.
- [ 12 ] 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): 622-624.
- [ 13 ] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada Mountains[J]. *Plant and Soil*, 2001, **237**(1): 15-23.
- [ 14 ] Bergner B, Johnstone J, Treseder K K. Experimental warming and burn severity alter soil CO<sub>2</sub> flux and soil functional groups in a recently burned boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(12): 1996-2004.
- [ 15 ] Welker J M, Fahnestock J T, Henry G H R, *et al.* CO<sub>2</sub> exchange in three Canadian high arctic ecosystems: response to long-term experimental warming [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(12): 1981-1995.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Certini G, Corti G, Agnelli A, *et al.* Carbon dioxide efflux and concentrations in two soils under temperate forests [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **37**(1): 39-46.
- [ 18 ] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(6): 667-677.
- [ 19 ] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1961-1967.
- [ 20 ] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, **396**(6711): 570-572.
- [ 21 ] 刘巧辉, 黄耀, 郑循华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1105-1111.
- [ 22 ] 陈书涛, 胡正华, 李涵茂, 等. 紫外(UV-B)辐射增强对拔节-孕穗期小麦植株呼吸和土壤呼吸的温度敏感性影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1249-1254.
- [ 23 ] 陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2858-2865.

## CONTENTS

Preface .....	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review .....	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water .....	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment .....	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation .....	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality .....	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing .....	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing .....	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO .....	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station .....	ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment .....	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw .....	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car .....	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai .....	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary .....	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation .....	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China .....	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season .....	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River .....	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site .....	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China .....	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai .....	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River .....	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake .....	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region; A Case Study of Baishui Glacier No. 1 .....	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification .....	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process .....	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body .....	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent .....	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors .....	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) .....	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage .....	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites .....	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters .....	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks .....	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation .....	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge .....	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field .....	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils .....	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i> .....	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste .....	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants .....	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China .....	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals .....	FU Guo-wei (4428)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行