

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析

李季, 吴洪生*, 高志球*, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 季炜, 钱景珊, 马世杰

(南京信息工程大学应用气象学院农业资源与环境系, 南京 210044)

摘要: 磷石膏是一种可以利用的磷化工废渣, 本文以磷石膏为麦田温室气体减排剂, 研究磷石膏对小麦生长、麦田温室气体二氧化碳 (CO₂) 排放的影响, 并分析磷石膏资源化利用的经济环境效益。结果表明, 在常规施肥条件下, 增施磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 能显著促进小麦生长, 增产达 37.71%。磷石膏对麦田 CO₂ 的减排作用在小麦生长的各个时期有所不同: 施用磷石膏 1 050 kg·hm⁻² 处理, 在小麦生长拔节期、抽穗期和灌浆期对麦田 CO₂ 的减排效果较为明显, 相比对照分别减少 8%、10% 和 6%; 在整个小麦生长季累计减少 CO₂ 排放 3%; 施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 处理, 在小麦越冬返青期、拔节期和抽穗期, 相比对照减少 CO₂ 排放 11%、4% 和 12%, 在小麦生长季累计减少 CO₂ 排放 7%。磷石膏施用量较大的处理对 CO₂ 的抑制和减排效果较好。研究还表明在施用磷石膏的情况下, 一定范围内, CO₂ 的排放强度 (单位鲜重 CO₂ 排放与单位产量 CO₂ 排放) 与小麦穗长、鲜重和产量呈现显著负相关: 即穗长越长, 鲜重和产量越大, CO₂ 的排放效率越低。在碳交易背景下, 磷石膏资源化利用具有较高的经济和环境效益, 主要体现在: 与对照相比, 投入/产出从 1: 8.3 变为 1: 10.7, 即在相同投入的情况下可提高 28.92% 的产出; 每吨磷石膏作为麦田温室气体减排剂, 可节省治理环境的费用与增产总额合计约 290 元。废渣磷石膏资源化利用, 不仅可以减少环境污染、促进小麦生长, 而且可以减少 CO₂ 排放, 对发展低碳农业、生态农业以及可持续发展农业具有重要应用价值。

关键词: 小麦田; 二氧化碳; 磷石膏; 增产; 减排; 经济效益; 环境效益

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3099-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.08.051

Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit

LI Ji, WU Hong-sheng*, GAO Zhi-qiu*, SHANG Xiao-xia, ZHENG Pei-hui, YIN Jin, Kakpa Didier, REN Qian-qi, Ogou Katchele Faustin, CHEN Su-yun, XU Ya, YAO Tong-yan, JI Wei, QIAN Jing-shan, MA Shi-jie

(Department of Agricultural Resources and Environment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Phosphogypsum is a phosphorus chemical waste which has not been managed and reused well, resultantly, causing environmental pollution and land-occupation. Phosphogypsum wastes were used as a soil amendment to assess the effect on wheat growth, yield and CO₂ emissions from winter wheat fields. Its economic and environmental benefits were analyzed at the same time. The results showed that wheat yield was increased by 37.71% in the treatment of phosphogypsum of 2 100 kg·hm⁻². Compared with the control treatment, throughout the wheat growing season, CO₂ emission was accumulatively reduced by 3% in the treatment of phosphogypsum waste of 1 050 kg·hm⁻², while reduced by 8%, 10%, and 6% during the jointing stage, heading date and filling period of wheat, respectively; while CO₂ emission was accumulatively reduced by 7% in the treatment of phosphogypsum waste of 2 100 kg·hm⁻² throughout the wheat growing season, as reduced by 11%, 4%, and 12% during the reviving wintering stage, heading date and filling period of wheat, respectively. It was better for CO₂ emission reduction in the treatment of a larger amount of phosphogypsum waste. In the case of application of phosphogypsum waste residue within a certain range, the emission intensity of CO₂ (CO₂ emissions of per unit of fresh weight or CO₂ emissions of per unit of yield), spike length, fresh weight and yield showed a significantly negative correlation—the longer the ear length, the greater fresh weight and yield and the lower the CO₂ emissions intensity. As to the carbon trading, phosphogypsum utilization was of high economic and environmental benefits. Compared with the control, the ratio of input to output changed from 1: 8.3 to 1: 10.7, which in the same situation of investment the output could be increased by 28.92%; phosphogypsum as a greenhouse gas reducing agent in the wheat field, it could decrease the cost and increase the environmental benefit

收稿日期: 2014-12-30; 修订日期: 2015-03-13

基金项目: 江苏省六大人才高峰资助计划项目(2009241); 江苏省大学生实践创新计划项目(201310300065); 江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX_0851)

作者简介: 李季(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业温室气体微生物生态学机制及其减排技术, E-mail: lij2013nuist@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuhsuck@163.com; zgao@nuist.edu.cn

totally about 290 yuan per unit of ton. The results demonstrated phosphogypsum wastes could obviously decrease the CO₂ emission from field soil and had a great potential to control agricultural greenhouse gases. Hopefully it has an important application perspective for the low-carbon, ecological and sustainable agricultural development.

Key words: wheat field; CO₂; phosphogypsum; increasing yield; reducing greenhouse gas; economic benefits; environmental benefits

磷石膏是磷肥、磷酸工业等所排放的废渣,其主要成分是二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O),占75%,还含有镁、铁、钠、硅等多种金属离子.近年来,全球磷石膏排放量达到1.5亿t·a⁻¹以上,这些工业废渣会污染环境,占用空间,同时造成资源浪费.有关磷石膏作为土壤改良剂的研究和应用,国内外已有大量的报道^[1-6].但是对于磷石膏在农田温室气体上减排功能的研究,还鲜有报道.

气候变化越来越被人们所重视.全球变暖的一个重要原因是大气当中的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)这3种温室气体浓度的不断增加.CO₂在大气中的存留时间可达5~200a^[8,9],对全球温室效应的贡献率达50%~60%^[10,11].IPCC5报告^[7]显示:2011年大气中CO₂的含量为391×10⁻⁶,这比1750年增加40%.IPCC4报告^[12]表明:农田是温室气体CO₂非常重要的源和汇.CO₂参与生态系统碳循环的整个过程^[13].农田中CO₂的排放主要来自于土壤微生物对有机质的分解作用以及植物本身的呼吸作用^[14].

小麦作为世界三大粮食作物之一,在我国的南北方都有非常广阔的种植面积.冬小麦田是CO₂主要的源和汇.对于农田CO₂的排放情况和减排措施的研究中,宋文质等^[13]表明农田CO₂浓度的增加,虽然可以促进作物对水分的利用,但随着气温的升高也会导致作物呼吸作用加快,干物质消耗增多而产量下降.万运帆等^[15]研究了翻耕等管理措施对农田CO₂排放的影响,认为经过翻耕的农田短期内CO₂的排放量会有显著上升.董玉红等^[16]经研究发现,施用不同种肥料,会促进CO₂的排放.这些研究都主要集中在肥料施用和田间管理等方面,对于施用减排剂减少麦田CO₂排放的技术和小麦生长

与麦田CO₂排放的相关性分析的报道相对较少.

自2005年《京都议定书》生效以来,全球碳交易发展迅速.碳交易^[17,18]是指温室气体排放权交易,其基本原理是:购买方向出让方购买温室气体减排额,再将购得的减排额用于减缓温室效应,从而实现其减排的目标.据统计2005~2009年全球碳交易量从7.04亿t增加到80.82亿t^[19,20],碳交易额更是从110亿美元增加到1360亿美元.近年来中国先后成立了北京环境交易所、上海环境能源交易所、天津排放权交易所和深圳排放权交易所等重要的碳交易所.我国在全球碳交易中占有极其重要的位置^[21].目前将碳交易与麦田CO₂减排技术的经济与环境效益分析相结合的研究鲜有报道.

本研究通过田间小区试验,将磷石膏资源化利用,作为温室气体减排剂,探讨其对小麦生长、产量及麦田CO₂排放的影响;分析在施用磷石膏的情况下,小麦生长与温室气体CO₂排放强度之间的相关关系.并在全球碳交易背景下,分析其经济与环境效益,寻找既能增加小麦产量又能减少麦田CO₂排放的新途径;同时寻找磷石膏资源化利用新途径,减少其对环境的污染,以期发展为循环经济,建设低碳高效型农业做贡献.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验材料

本次试验在南京信息工程大学农业气象试验站(32°08'N,118°49'E)内农田进行,该地自然条件属于亚热带季风气候,年平均降水为1100mm,年平均温度为15.6℃.耕作层土壤为北亚热带黄棕壤,属于黏质土且黏粒质量分数为26.1%.前茬作物为玉米,试验前土壤基础理化性质详见表1.

表1 供试土壤基础理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties

有机质/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	pH
12.01	15.08	87.65	80.28	0.75	7.2

试验所用的磷石膏废渣来自中国石油化工集团南化公司的磷肥厂,其主要成分的含量为:CaO 296.8g·kg⁻¹,SO₃ 415.9g·kg⁻¹,SiO₂ 60.6g·kg⁻¹,P₂O₅ 28.5g·kg⁻¹,pH 2.15.

供试小麦品种:宁麦13(江苏中江种业公司).

试验所用PVC材料制成的静态暗箱规格为50cm×50cm×110cm,共分底座、箱体和上盖这3个部分.

1.2 试验设计

本试验共设 5 个处理,分别为①CK1:施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 种植小麦;②磷石膏减排剂 1:施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏 1 050 kg·hm⁻² + 种植小麦(减 1);③磷石膏减排剂 2:施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏废渣 2 100 kg·hm⁻² + 种植小麦(减 2). 小区面积为 16 m² (4 m × 4 m),四周筑有宽 50 cm、高 20 cm 的田埂,将田间分割成互相独立的小区. 每个处理设置 3 个重复,试验小区随机排列. 试验所用复合肥(中东化肥公司)总含量为 45% (N + P₂O₅ + K₂O = 45%),一次性作基肥施用;磷石膏也在种植前与复合肥一起一次性施用. 2014 年 4 月 26 日所有施肥处理追施尿素 75 kg·hm⁻².

小麦播种日期为 2013 年 10 月 30 日,种植密度为 1.2 × 10⁷ 苗·hm⁻²,播种时南北行向种植. 每个集气箱底座(50 cm × 50 cm)有 30 株苗,2013 年 11 月 10 日出苗. 播种后一次性灌足田间水分,其他田间管理措施均相同. 2014 年 5 月 30 日收获.

1.3 样品采集与测定

1.3.1 气样采集与测定

试验采用静态箱-气相色谱法测定温室气体 CO₂ 的排放通量^[22,23]. 小麦出苗后,于每小区选取麦苗长势均匀的地块,将集气箱的底座固定于土壤中. 待小麦出苗到平均株高为 15 cm 左右时开始采集气样,平均每 4 ~ 5 d 采集一次气样. 施肥后或有降水等天气变化时,适当地增加采样频率. 春节前后的冬小麦生长季,气样采集间断两周左右. 每次采集气样的时间固定在上午 09:00 ~ 11:00 之间,采集气样前,向箱体连接处的凹槽内加水密封;采样前后分别记录箱内悬挂的温度计示数. 基于试验的重现性,采用 5 个箱体进行平行采样. 箱体密闭后静置约 10 min 使箱内气体混合均匀. 采样时间分别为气样混匀后的 0、5、10、15、20 min,每次用装有三通阀的注射器采样 20 mL.

气样采集当天用 Agilent7890A 气相色谱仪^[24]分析 CO₂ 的排放量. 色谱分析条件:CO₂ 的检测器 FID,检测温度 300℃;使用色谱柱 SS-2m × 2 mm × Porapak Q(60/80),柱温 50℃;转化器为镍触媒,温度 375℃;载气高纯 N₂ (流量 25 cm³·min⁻¹);燃气为 H₂ (流量为 45 cm³·min⁻¹) 和空气 (流量为 400 cm³·min⁻¹);保留时间 1.40 min. 标准气体来自南京上元工业气体厂,CO₂ 质量分数为 343 × 10⁻⁶.

根据气样浓度与时间线性关系的斜率以及采样时箱内气体的温度,来计算小麦田 CO₂ 的排放通量. CO₂ 排放通量按下式计算^[20,25]:

$$F = 60 \cdot \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 为 CO₂ 排放通量 [mg·(m²·h)⁻¹]; ρ 为标准状态下 CO₂ 的密度 (1.977 kg·m⁻³); V 为集气箱内有效空间体积 (m³); A 为集气箱的横截面积 (m²); dc/dt 为单位时间内 CO₂ 的排放率 (× 10⁻⁶·min⁻¹); T 为采样时集气箱内的平均温度 (°C).

CO₂ 的排放通量用每个处理 3 个重复的平均值及标准差表示.

1.3.2 小麦植株样品的采集与测定

2014 年 5 月 30 日收获时,按试验小区为单位,分别进行收割. 单收单打,并选取具有代表性的植株样本测定各小区内小麦的株高、鲜重、穗长、穗重等指标. 再进行脱粒和晾晒,经适当筛选除秕粒后称量,以计算小麦的千粒重和产量.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对试验数据进行分析作图以及用 LSD 方法进行显著性分析;用 SPSS 19.0 进行相关性分析.

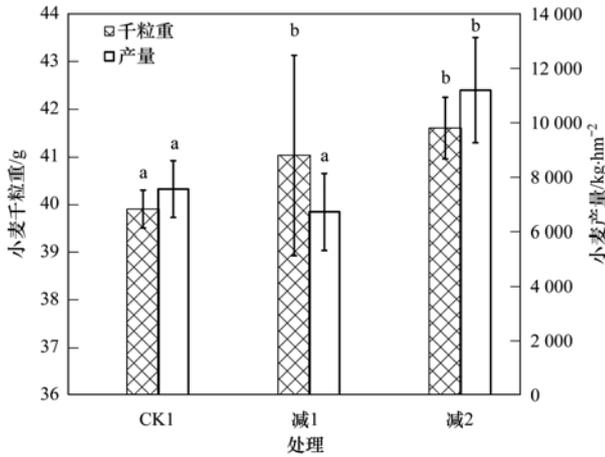
2 结果与分析

2.1 施用磷石膏减排剂对大田小麦产量和干粒重的影响

从图 1 可以看出,各处理之间的小麦千粒重:减 2 > 减 1 > CK1,处理减 2 和减 1 与 CK1 相比分别增加了 2.86% 和 4.29%. 两个减排剂处理之间的差异并不显著,但仍可看出施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 对小麦千粒重的增加效果更好. 对比各处理之间的产量,差异十分明显,可看出小麦的产量排位:减 2 > CK1 > 减 1,其中处理减 2 相对于 CK1 增加显著,增幅为 48.11%;这说明:施用磷石膏 1 050 kg·hm⁻² 对小麦增产作用小,而施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 的增产作用十分显著 ($P < 0.05, n = 5$);两个减排剂处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05, n = 8$).

2.2 施用磷石膏减排剂对麦田 CO₂ 排放量的影响

从图 2 中可见,处理 CK1、减 1 和减 2 处理的 CO₂ 排放量曲线变化趋势十分吻合. 其中,处理减 1 和减 2 相对于 CK1,CO₂ 的排放量有所降低,且减排情况随时间的变化而变化. 在整个小麦生长季,经计算减 1 处理相对于 CK1,累计减少 CO₂ 排放 3%;



柱形上方不同字母表示 0.05 置信水平; CK1 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 种植小麦); CK3 (不施肥 + 种植小麦); 减 1 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏 1 050 kg·hm⁻² + 种植小麦); 减 2 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏 2 100 kg·hm⁻² + 种植小麦)

图 1 施用磷石膏减排剂对小麦千粒重和产量的影响

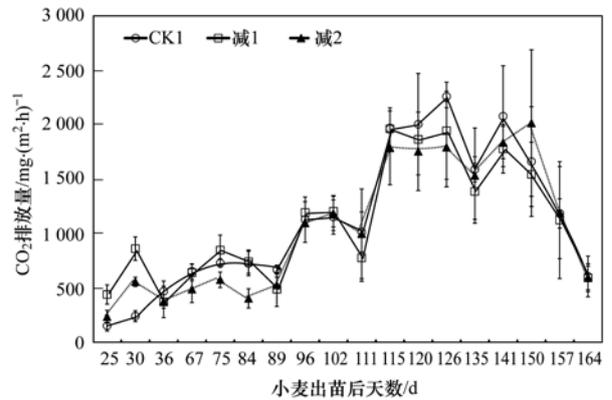
Fig. 1 Impact of phosphogypsum on wheat grain weight and yield

减 2 相对于 CK1, 累计减少 CO₂ 排放 7%。由图 3 可知, 随着时间的变化, 气温和土壤温度的变化趋势与 CO₂ 排放量变化趋势, 主要表现为: 小麦生长中期基本吻合, 但在小麦生长初期和末期并不一致。这说明在小麦生长初期和成熟之后, 温度变化对麦田 CO₂ 排放的影响不大, 但在小麦生长旺季, 随着温度升高, 麦田 CO₂ 的排放量逐渐升高。磷石膏处理虽然整体减排效果不是特别显著, 但从图 4 可以看出在小麦的不同生长阶段, 两个减排剂处理都表现出不同程度的减排效果; 尤其是在小麦的拔节期、抽穗期和灌浆期, 减 1 处理相对于 CK1 对 CO₂ 减排效果最为明显, 使得 CO₂ 排放分别减少 8%、10% 和 6%; 而减 2 处理相对于 CK1 对 CO₂ 的减排效果突出表现在小麦的越冬返青期、拔节期和抽穗期, 分别减少 CO₂ 排放 11%、4% 和 12%。通过趋势分析可知, 且随着磷石膏施用量的增加 CO₂ 的生长季平均排放量和总排放量降低。这表明施用磷石膏减排剂对于小麦田 CO₂ 的减排效果与磷石膏的用量和施用时间有关, 在适当的时间施加适当用量的磷石膏, 可以达到很好的减排效果。

2.3 麦田碳排放强度与小麦产量及生物量之间的关系

碳排放强度指分析主体的二氧化碳排放量与主体产值的比值, 也可称之为碳排放效率。从碳排放强度的角度出发, 将麦田 CO₂ 排放情况与小麦的生长情况做相关分析, 结果如表 2。

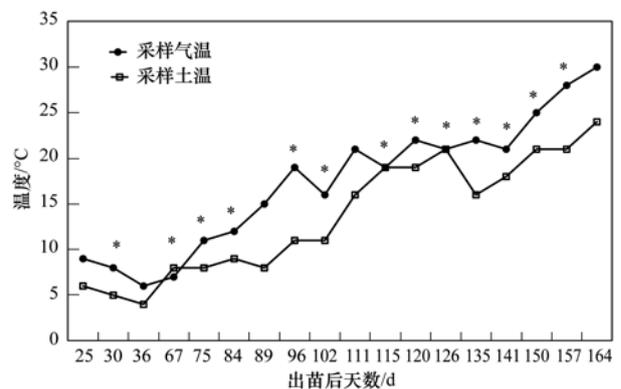
从表 2 中麦田 CO₂ 排放量与冬小麦产量、鲜重以及地上部分生物量之间的相关关系可以看出: 单位鲜重的小麦生长季 CO₂ 累积排放量与小麦鲜重呈显著负相关、单位产量小麦生长季 CO₂ 累积排放量与小麦的穗长和产量均呈现极显著负相关、且穗长与产量也存在着显著的正相关, 即在施用一定量磷石膏减排剂的条件下, 麦田 CO₂ 的排放强度与小麦的穗长和产量有关。在一定范围内, 小麦的穗长越长, 产量越高, 麦田的 CO₂ 排放强度越低; 小麦的鲜重越高, 单位鲜重的 CO₂ 排放量越低。这说明: 施用磷石膏减排剂在增加小麦穗长、鲜重和产量的同时可以显著的降低麦田 CO₂ 的排放效率。



CK1 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 种植小麦); 减 1 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏 1 050 kg·hm⁻² + 种植小麦); 减 2 (施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏 2 100 kg·hm⁻² + 种植小麦)

图 2 施用磷石膏减排剂麦田 CO₂ 排放通量的影响

Fig. 2 Impact of phosphogypsum on CO₂ emissions from wheat field



* 日期为采样前后 3 d 内有降水

图 3 采集气样期间气温、土温以及降水情况

Fig. 3 Air temperature, soil temperature and precipitation of the sampling period

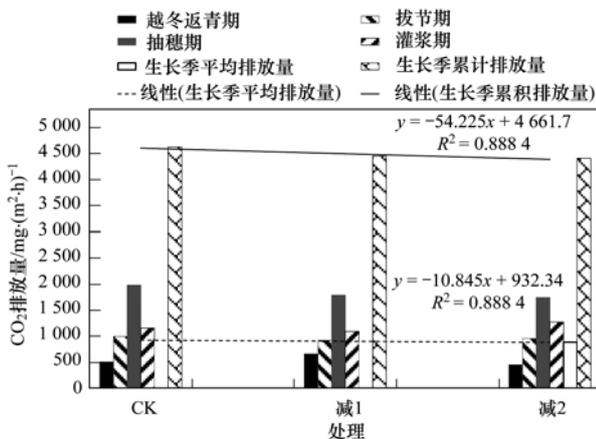
从表 2 中的相关系数也可以看出, 小麦的鲜重与生长季 CO₂ 的平均排放量和单位产量 CO₂ 排放量都有着较高的负相关性, 虽然未达到显著程度, 仍

表 2 麦田 CO₂ 排放量与小麦生物量之间的相关关系¹⁾

Table 2 Correlation between CO₂ emissions and wheat biomass

	生长季平均 CO ₂ 排放量	单位鲜重 CO ₂ 排放量	单位产量 CO ₂ 排放量	穗重	穗长	鲜重	产量
生长季平均 CO ₂ 排放量	1						
单位鲜重 CO ₂ 排放量	0.975	1					
单位产量 CO ₂ 排放量	-0.831	0.934	1				
穗重	-0.963	-0.879	-0.649	1			
穗长	-0.821	-0.927	-1.000 **	0.636	1		
鲜重	-0.951	-0.996 *	-0.962	0.832	0.957	1	
产量	0.841	0.967	-1.000 **	0.663	0.999 *	0.967	1

1) 数字为相关系数; * 表示 0.05 置信水平; ** 表示 0.01 置信水平



CO₂ 排放量为小麦生长各阶段采样时间范围内 CO₂ 的平均排放量; 越冬返青期(出苗后约 20~80 d)、拔节期(出苗后 80~110 d)、抽穗期(出苗后约 110~140 d)、灌浆期(出苗后约 140~160 d)。CK1(施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 种植小麦); 减 1(施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏废渣 1 050 kg·hm⁻² + 种植小麦); 减 2(施用 45% 复合肥 900 kg·hm⁻² + 磷石膏废渣 2 100 kg·hm⁻² + 种植小麦)

图 4 不同生长阶段各处理间 CO₂ 平均排放通量的比较

Fig. 4 Comparison of CO₂ emission flux among treatments in various stages of growth

表 3 施用磷石膏废渣对麦田经济效益(投入/产出)的影响

Table 3 Impact of the application of phosphogypsum on the economic benefits (input/output) of wheat

项目	投入			产出				投入: 产出
	种子	复合肥	磷石膏	产量		CO ₂ 排放额		
	CK1、减 2	CK1、减 2	减 2	减 2	CK1	减 2	CK1	
数量/kg·hm ⁻²	155.47	895.52	2 114.43	11 144.28	7 529.05	52 969.11	56 683.91	
金额/元·hm ⁻²	777.36	1 119.40	422.89	27 509.65	18 585.47	2 633.09	2 817.76	
经济效益 /元·hm ⁻²	减 2	2 319.65			24 876.56			1: 8.3
	CK1	1 896.76			15 767.71			1: 10.7

产出增加 28.92%, 也就是同样的投入情况下, 施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 的地块可以得到 128.92% 的收入, 经济效益大幅提高。由此可见, 将磷石膏作为农田温室气体减排剂施用, 在减少农田 CO₂ 的排放的同时增加小麦产量, 能显著加经济效益。

从图 5 中磷石膏资源化利用的环境效益分析可

能说明鲜重增加对 CO₂ 排放有着一定的影响。

2.4 磷石膏废渣资源化利用的经济与环境效益分析

从 2005~2009 年全球碳交易量与碳交易额逐年增长的变化趋势来看^[17,18], 碳交易市场越来越受到广泛的关注。根据人大经济论坛 (<http://bbs.pinggu.org/>) 提供的我国北京、广州、上海、深圳以及天津这 5 个主要碳交易所 2013 年 11 月 28 日至 2014 年 3 月 28 日期间碳交易相关数据可知, 深圳碳交易平均价格最高达到 68.56 元·t⁻¹, 天津的碳交易价格相对最低, 为 28.50 元·t⁻¹。经计算, 我国五大碳交易所平均碳交易价格为: 49.71 元·t⁻¹。根据金谷粮食网 (<http://www.82158.com/xiaomai/price.php?diqu=江苏>) 公布的 2014 年江苏小麦市场价格以及麦种、复合肥和磷石膏市场价格数据, 计算和分析处理 CK1 与处理减 2(减 2 处理对小麦生长季 CO₂ 累积排放量的减排效果均优于减 1 处理) 种植冬小麦(宁麦 13 号) 的投入与产出情况, 用(投入/产出) 来表示经济效益, 如表 3。

从表 3 中数据可知: 施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻² 后, 麦田的投入: 产出, 由 1: 8.3 提高为 1: 10.7, 即

以看出, 将磷肥厂废渣磷石膏作为废弃物堆放时, 每吨磷石膏需要至少 200 元的处理费; 将磷石膏作为农田温室气体减排剂施用, 仅从温室气体减排的角度讲, 按照试验处理减 2(施用磷石膏 2 100 kg·hm⁻²), 1 t 磷石膏可以减少温室气体排放 3.71 t, 即环境收益达到 87.33 元。由此推算: 将磷石膏废

渣作为温室气体减排剂资源化利用,1 t 磷石膏实际可创造的收益为 287.33 元,具有很高的环境效益和应用价值。

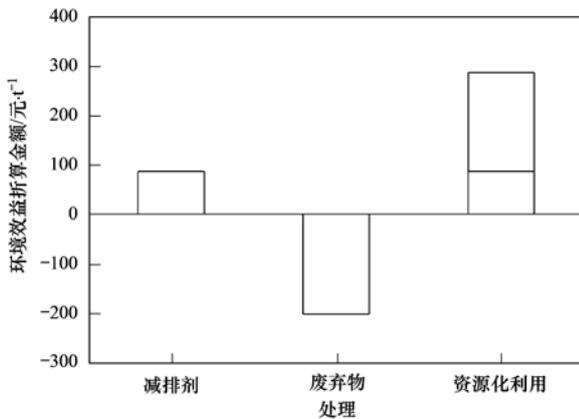


图 5 磷石膏温室气体减排剂的环境效益

Fig. 5 Environmental benefits of phosphogypsum waste as reducing greenhouse gas emission

综合表 3 与图 5 的数据,磷石膏用作农田温室气体减排剂后,每吨磷石膏可创造的经济与环境效益非常可观,不仅减少磷石膏的直接环境污染,而且促进作物生长,有利于发展低碳高效农业。

3 讨论

3.1 磷石膏促进小麦生长并减少麦田 CO₂ 排放的分析

Mullins 等^[26] 施加磷石膏作为硫肥来种植小麦,结果表明磷石膏可以显著提高小麦的品质和产量。吴洪生等^[6] 发现,在一定的施用量范围之内,磷石膏废渣对小麦株高及地上生物量的增加程度与其施用量成正比,同时能够显著降低土壤 pH 值,改善土壤的理化性质,对土壤全氮含量等均有贡献。磷石膏可以改良土壤理化性质,防止水土流失,促进作物对养分的吸收和固定,从而促进冬小麦的生长,增加冬小麦的产量,这与本研究结果一致。

对于小麦田 CO₂ 的排放的研究,张衍华等^[27]、朱治林等^[28] 发现,从小麦群体的生长季节变化来看,CO₂ 的排放量呈现的规律为:拔节期 > 灌浆期 > 返青期,也就是说前后期小而中间期大。这与本试验所得出的结论(图 5)是一致的。主要原因是在越冬返青期,小麦群体的长势相对较弱,环境温度比较低,会影响 CO₂ 的排放^[14]。而随着天气转暖,小麦根系和土壤微生物的活性逐渐增加^[20],土壤呼吸与植物本身的呼吸作用也都增强,使得 CO₂ 排放增加,这一点从本研究小麦生长季温度记录也可以得

到验证。很多学者都认为农田 CO₂ 的排放主要来自于土壤呼吸和植物呼吸作用^[29,30]。土壤呼吸包括 4 个过程:植物根呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸以及含 C 物质的化学氧化作用。土壤 CO₂ 排放实际是土壤中的生物代谢和生物化学过程等所有因素的综合产物^[31]。毕建杰等^[32] 表明:施肥能促进植物根系生长和呼吸速率,增强了土壤中微生物的活性和有机质的分解,从而提高了 CO₂ 的排放,可以解释本试验中所得到的结果。本研究小麦生长季试验田降水较多,对植物的根系呼吸作用和植物的光合作用也产生很大影响,使得 CO₂ 排放曲线产生较多波动情况。

目前对于磷石膏作为减排剂对小麦田 CO₂ 排放影响的研究很少,具体机制并不明确。但可推测,磷石膏中富含的微量元素和离子可能抑制了土壤中微生物的活性,通过降低土壤的 pH 值、改善土壤理化性质以及活化土壤养分或影响土壤碳素与氮素的比例等,来直接或间接地影响土壤中有机的成分及含量,从而影响土壤微生物的呼吸作用以及土壤微生物对有机质的分解来减少土壤 CO₂ 的排放。磷石膏中含有的钠离子等有利于小麦根系对营养物质的吸收利用,在促进小麦生长的同时能减弱作物的呼吸作用,从而减少 CO₂ 的排放。但具体的生态学机制仍有待深入研究。

3.2 磷石膏资源化利用的经济与环境效益分析

磷石膏废渣主要来自磷酸和磷肥的生产,生产 1 t 磷肥约造成 3 t 的磷石膏,生产 1 t 磷酸可产生 5 t 左右的磷石膏,我国的磷酸磷肥产业需求很大,每年产生大量的磷石膏,随意堆放会造成严重的环境污染,治理磷石膏污染也是一笔不小的开支。目前磷石膏主要作为土壤改良剂被利用,并没有被充分的资源化应用。本研究将磷石膏作为农田温室气体减排剂进行资源化利用,不仅降低了磷石膏造成的环境污染所需的治理费用,还能减少麦田 CO₂ 排放、提高小麦产量从而增加农民收入,具有重要价值和应用前景,为构建节能环保,低碳高效农业提供了有力的技术支持。

综上所述,磷铵工业废渣磷石膏,作为一种污染环境工业固体废弃物,可以实现资源化利用,用作土壤改良剂的同时又可作为农田温室气体的减排剂。在促进小麦生长、提高小麦产量的同时,抑制小麦田 CO₂ 的排放,并且在适当的小麦生长阶段施加适量的磷石膏,有望达到增产减排的最佳效果。相对于单独施用复合肥,加施磷石膏更有利于增产

和减排,创造双重经济价值和环境效益。

4 结论

(1)施用磷石膏可显著促进小麦的生长,用量较多的处理增产效果更明显。

(2)施用磷石膏减排剂对麦田 CO₂ 的排放有一定的抑制和减排作用。

(3)在施用一定量磷石膏的条件下,麦田 CO₂ 的排放量与冬小麦产量、鲜重以及穗长呈现显著的负相关关系,小麦的穗长越长,鲜重越大、产量越高,麦田 CO₂ 排放率越低。

(4)磷石膏资源化利用,开发作为农田温室气体减排剂使用,可以显著提高冬小麦的投入与产出比,能实现经济效益与环境效益的统一。

参考文献:

- [1] Al-Karaki G N, Al-Omouh M. Wheat response to phosphogypsum and mycorrhizal fungi in alkaline soil [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, **25**(4): 873-883.
- [2] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of powdered phosphogypsum on the infiltration rate of sodic soils [J]. *Irrigation Science*, 1986, **7**(1): 53-61.
- [3] 周晓冬, 吴洪生, 张富存, 等. 磷石膏资源化利用对小麦生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2012, **25**(3): 940-944.
- [4] 吴洪生, 周晓冬, 张富存, 等. 磷石膏浸提液对豌豆种子生理及幼苗生长的影响[J]. *广西植物*, 2013, **33**(3): 401-405.
- [5] 白来汉, 张仕颖, 张乃明, 等. 不同磷石膏添加量与接种菌根对玉米生长及磷、钾、硫吸收的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2485-2492.
- [6] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(6): 1262-1266.
- [7] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [A]. In: Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, *et al* (Eds.). Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [8] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 5-48.
- [9] IPCC. Climate Change 2001 [EB/OL]. 2001. <http://www.ipcc.ch/>.
- [10] IPCC. Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [11] Bouwman A F. The role of soils and land use in the greenhouse effect [R]. Wageningen: ISRIC-World Soil Information, 1989.
- [12] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability [R]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2007. 750-752.
- [13] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究 [J]. *环境科学*, 1996, **17**(1): 85-92.
- [14] 马秀梅, 朱波, 韩广轩, 等. 土壤呼吸研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(增刊): 491-495.
- [15] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响初探 [J]. *中国农业气象*, 2004, **25**(3): 8-10.
- [16] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(7): 1303-1307.
- [17] 郑爽. 碳市场的经济分析 [J]. *能源与环境*, 2007, **29**(9): 5-10.
- [18] 李挚萍. 《京都议定书》与温室气体国际减排交易制度 [J]. *环境保护*, 2004, (2): 58-60.
- [19] 江璐林. 全球碳交易价格波动影响因素分析 [J]. *文史博览(理论)*, 2011, (10): 71-72, 87.
- [20] 李婷, 李成武, 何剑锋. 国际碳交易市场发展现状及我国碳交易市场展望 [J]. *经济纵横*, 2010, (7): 76-80.
- [21] 王修华, 赵越. 我国碳交易的定价困境及破解思路 [J]. *理论探索*, 2010, (3): 66-69.
- [22] 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算 [J]. *科学通报*, 2004, **49**(3): 258-264.
- [23] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究 [J]. *中国农业气象*, 2005, **27**(2): 122-124.
- [24] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(10): 84-90.
- [25] 纪洋, 张晓艳, 马静, 等. 控释肥及其与尿素配合施用对水稻生长期 N₂O 排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(8): 2031-2037.
- [26] Mullins G L, Mitchell C C J. Use of phosphogypsum to increase yield and quality of annual forages [M]. Bartow: Florida Institute of Phosphate Research, 1989. 1-49.
- [27] 张衍华, 毕建杰, 林艳芹, 等. 施肥对不同品种麦田 CO₂ 通量的影响 [J]. *华北农学报*, 2006, **21**(增刊): 114-118.
- [28] 朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 作物群体 CO₂ 通量和水分利用效率的快速测定 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(9): 1684-1686.
- [29] 刘洪升, 刘华杰, 王智平, 等. 土壤呼吸的温度敏感性 [J]. *地理科学进展*, 2008, **27**(4): 51-60.
- [30] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 壤土剖面 CO₂ 浓度的动态变化及其受环境因素的影响 [J]. *土壤学报*, 2004, **41**(5): 827-831.
- [31] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. *Botanical Review*, 1977, **43**(4): 449-528.
- [32] 毕建杰, 劳秀荣, 周波, 等. 施肥与品种演替对麦田 CO₂ 排放量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(6): 165-169.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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