

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	
《环境科学》征稿简则 (1635)	
信息 (1724, 1769, 1800)	

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响

朱浩宇¹, 高明¹, 龙翼², 徐国鑫¹, 王富华¹, 王子芳^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 化肥减量配施有机肥是实现环境友好, 保持耕地质量的国家战略, 对防治土壤污染和实现农业可持续发展具有重要意义。以三峡库区紫色土旱坡地为研究对象, 通过田间试验研究了在油菜/玉米轮作模式下, 对照处理、常规施肥、优化施肥、生物炭(化肥减量配施生物炭)及秸秆还田(化肥减量配施秸秆还田)这5个处理对土壤氮、磷形态、作物氮磷含量、肥料利用率及作物产量的影响。结果表明, 土壤铵态氮含量在油菜季的秸秆处理最高, 为 $4.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各处理玉米季的土壤铵态氮和碱解氮含量均明显高于油菜季。化肥减量配施有机肥可以保障并提高土壤全氮的含量。其中, 秸秆处理的油菜季和玉米季土壤全氮含量均最高, 分别为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。秸秆处理的油菜季土壤有效磷含量最高($0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。化肥减量配施有机肥的土壤全磷含量较常规处理没有显著差异($P > 0.05$)。化肥减量配施有机肥表现出略有增产的趋势, 其中生物炭处理的油菜产量最高($2328 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); 常规处理的玉米产量最高($5838 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。无论油菜季还是玉米季, 各化肥减量处理较常规处理都普遍提高了氮肥和磷肥的农学利用率。在紫色土地区中, 化肥减量配施生物炭和秸秆还田均有利于改善土壤养分、提高化肥利用率, 达到减少氮肥、磷肥施用量和提高作物产量的效果。

关键词: 化肥减量; 生物炭; 秸秆还田; 土壤养分; 化肥利用率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1921-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909153

Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field

ZHU Hao-yu¹, GAO Ming¹, LONG Yi², XU Guo-xin¹, WANG Fu-hua¹, WANG Zi-fang^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The reduction in chemical fertilizers combined with organic fertilizers is a national strategy to achieve environmental friendliness and maintain the quality of cultivated land. It is of great significance for the prevention and control of soil pollution and the sustainable development of agriculture. In this study, purple soil and sloping land in the Three Gorges Reservoir area was studied. The field experiment method was used to study the control, conventional fertilization, optimized fertilization, biochar (fertilizer combined with biochar), and straw under rapeseed/corn rotation mode. The effects of five treatments on soil nitrogen/phosphorus form, crop nitrogen and phosphorus content, fertilizer utilization rate, and crop yield were studied in the field (fertilizer reduction combined with straw returning). The results showed that the soil ammonium nitrogen content was the highest in the rapeseed season, which was $4.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The contents of ammonium nitrogen and alkali nitrogen in the treated corn season were significantly higher than those in the rape season. The reduction in chemical fertilizers can guarantee and increase the total nitrogen content of the soil. Among them, the total nitrogen content in the rapeseed and corn seasons treated with straw was the highest ($0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively). The soil treated with straw in the rapeseed season had the highest available phosphorus content ($0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Compared with conventional treatment, the reduction of chemical fertilizers combined with organic fertilizer did not significantly reduce the total phosphorus content of soil. The reduction of fertilization combined with organic fertilizer showed a slight increase in yield but showed the highest yield of rapeseed treated by biochar ($2328 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and the highest yield of conventionally treated maize ($5838 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). However, there was no significant difference in each treatment ($P > 0.05$). Regardless of the rapeseed season or the corn season, the reduction of fertilization treatment generally improved the agronomic utilization rate of nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer. In the purple soil area, the combination of chemical fertilizer reduction and biochar and straw returning were beneficial to improve soil nutrients, improve fertilizer utilization, and reduce the effects of nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer application on crop yield.

Key words: fertilizer reduction; biochar; straw returning; soil nutrient; fertilizer utilization

近年来,人们在农业生产中长期大量施用化肥,造成土壤酸化,土壤养分失调,面源污染等问题。这

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101); 重庆市技术创新与应用专项(cstc2018jszx-zdyfxmX0014)

作者简介: 朱浩宇(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境,E-mail: 953744027@qq.com

* 通信作者, E-mail: zifangw@126.com

不仅降低作物对氮素和磷素的吸收利用率,而且严重影响作物的产量和品质^[1].因此,减少化肥施用量并配合其他有机肥来缓解过量施肥带来的土壤质量退化是农业生产中亟需解决的问题.生物炭作为一种新型有机肥主要来源于工农业生产中的废弃物,其在降低土壤容重,提高土壤肥力等方面具有多重效益,已逐步在农业生产中广泛利用^[2];秸秆还田已成为我国农作物肥料结构变化的关键性技术措施之一,我国每年秸秆总资源可以达到 8 亿 t,占世界总量的 1/3 左右^[3].秸秆中含有大量的氮素、磷素,将秸秆还田后,可以有效减少化肥的施用量,提高肥料利用率,从而达到土壤培肥的效果^[4-6].秸秆作为新兴的生物质能源,通过合理的还田,不仅能实现资源循环再利用,还可以缓解化肥过量施用带来的土壤退化等问题.

生物炭和秸秆还田对土壤养分和作物的影响已成为国内外研究的热点.随着向土壤中施用生物炭数量和年限的增加,土壤 pH 值和碳氮比呈现上升趋势,土壤容重降低^[7],同时生物炭具有丰富的孔隙度和较大的比表面积,因此具有较强的吸附性,可以显著地减少土壤养分流失^[8].Albuquerque 等^[9]通过小区试验,向土壤中加入生物炭后发现植株生物量增加了 26%~31%,并有效促进了植株叶片的生长.Jeffery 等^[10]通过统计分析生物炭与作物生产力之间的关系发现,施用生物炭可以使作物平均增产 10%左右;秸秆还田对土壤养分和作物产量具有一定的影响.陈森等^[11]研究表明,与单施化肥相比,秸秆还田可以提高辣椒产量 7.57%.陈正刚等^[12]通过 3 a 田间试验,在翻压 15 t·hm⁻²光叶苕子并配合减少 45% 化肥用量发现玉米产量可达到当地常规产量,减少 15%~30% 的化肥用量,玉米产量可显著增加 13.52%~25.70%,同时可以提高土壤有机质、全氮、速效氮含量,保持有效磷和有效钾含量,降低土壤容重.

目前对于化肥减量配施生物炭或者秸秆还田的研究主要集中在东北和华北等北方地区^[13-15],对南

方地区的研究较少,主要集中在配施不同比例的肥料、耕作方式和不同肥料施加量等方面^[16-19],特别是在三峡库区紫色土旱坡地的配施生物炭和秸秆还田对土壤养分及油菜/玉米轮作产量等的影响方面鲜见研究.长江上游的紫色丘陵区是我国西南地区重要的农业区域.本试验通过研究化肥减量配施生物炭或秸秆还田对紫色土旱坡地土壤不同氮素、磷素形态以及作物各部位氮、磷养分含量及产量的影响,揭示减量施肥配施生物炭或秸秆在协调土壤养分供应方面的作用机制,达到提高化肥利用率,减少环境污染,以期为三峡库区施肥方式提供科学依据,实现农业资源可持续利用.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验位于中国科学院成都山地所三峡库区水土保持与环境研究试验站(E108°10',N30°22').研究区属亚热带东南季风区,年均温度 19.2℃,年均降雨量为 1 150 mm,无霜期 320 d 左右.试验小区位于长江主河道北岸,土壤为紫色土,坡度为 15°,在三峡库区坡耕地类型上具有很强的代表性,土壤基本理化性质为:pH 8.3,有机质 7.6 g·kg⁻¹,速效磷 9.2 mg·kg⁻¹,速效钾 100 mg·kg⁻¹,全氮 0.35 g·kg⁻¹,全磷 0.30 g·kg⁻¹,全钾 32.3 g·kg⁻¹.试验中所用生物炭全氮含量为 5.2 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.1 g·kg⁻¹,还田玉米秸秆的全氮含量为 8.2 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.2 g·kg⁻¹.

1.2 试验设计

试验小区为长方形,小区投影面积为 100 m²(20 m×5 m),底面以及四周均为混凝土修筑,坡度为 15°,土层厚度为 60 cm.本试验设置 5 个处理,分别为:①不施肥处理(对照处理);②常规施肥处理;③优化施肥处理;④减量施肥配施生物炭处理;⑤减量施肥配施秸秆处理.各处理分别标记为对照、常规、优化、生物炭和秸秆,各处理 3 次重复,具体施肥量见表 1.

表 1 各处理施肥量/kg·hm⁻²
Table 1 Amount of fertilizer applied in each treatment/kg·hm⁻²

项目	处理	纯 N	P ₂ O ₅	K ₂ O	硼砂
油菜季	对照	0	0	90	15
	常规施肥	150	90	90	15
	优化施肥	120	75	90	15
	85% 优化施肥 + 4.5 × 10 ³ kg·hm ⁻² (以秸秆计)	102	64.5	90	15
	85% 优化施肥 + 1 × 10 ⁴ kg·hm ⁻² (以生物炭计)	102	64.5	90	15
玉米季	对照	0	0	135	—
	常规施肥	300	150	135	—
	优化施肥	270	120	135	—
	85% 优化施肥 + 4.5 × 10 ³ kg·hm ⁻² (以秸秆计)	229.5	102	135	—
	85% 优化施肥 + 1 × 10 ⁴ kg·hm ⁻² (以生物炭计)	229.5	102	135	—

本试验种植模式采用“油菜-玉米两熟”制,于 2017 年 10 月 23 日种植油菜开始,2018 年 10 月 22 日结束,油菜和玉米的肥料用量依照当地农民种植施用量进行减量施用,各季作物栽培方式和田间管理措施均按照当地习惯进行。其中油菜于 2017 年 10 月 23 日栽种,2018 年 4 月 29 日收获。玉米于 2017 年 4 月 13 号栽种于油菜行间,2018 年 7 月 20 日收获。油菜季氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占 80%),磷肥、钾肥、硼肥做基肥一次性施入,基肥和基肥施用时间分别为 2017 年 11 月 7 日和 2017 年 12 月 5 日,于小雨前后撒施。玉米季肥料分 2 次施入,第 1 次为玉米移栽时,各处理均施入 2.5 kg 尿素,其余肥料于 4 月 27 日一次性施入。

1.3 采样与测定方法

土样采集:在各个小区中作 3 次随机采样表层土(0~20 cm),并将各个小区采样的土壤混合,用四分法取 1 kg 鲜土带回实验室,用于分析土壤的氮、磷等基本理化性质。试验过程共采样 3 次,第 1 次(2017 年 10 月 22 日)是试验处理前进行基础土样采集,第 2 次(2018 年 4 月 29 日)是油菜收获后采样,第 3 次(2018 年 7 月 20 日)是玉米收获后采样。

植株样采集:油菜和玉米在成熟后,采用人工采摘法。每个试验小区的植株随机整取 3 株,将其晒干后,分别计算油菜、玉米产量和肥料利用率。

测定方法:土样测定的指标中,全氮用 H_2SO_4 消煮-凯氏定氮法测定;全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;全钾用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定;铵态氮用 KCl 提取-靛酚蓝比色法测定;硝态氮用 KCl 提取-紫外分光光度法测定;速效磷用钼蓝比色法测定。泥沙样全氮、全磷测定方法与土样相同。植株样测定的指标中,全氮用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,蒸馏滴定测定;全磷用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,钒钼黄比色法测定。

肥料农学利用率($kg \cdot kg^{-1}$) =

(施肥处理产品 - 不施肥处理产品)/施肥量

具体测定详细步骤参见文献[20,21]。

1.4 数据分析

利用 SPSS 23.0 和 Excel 2016 软件进行数据统计分析和图表制作。本文所有结果由 3 次重复数据的平均值表示。采用 LSD 法对各处理的数据进行方差分析和显著性检验,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤氮素含量的影响

2.1.1 土壤铵态氮含量特征

从图 1 可以看出,化肥减量及配施有机肥同样

可以达到常规施肥对土壤铵态氮增加的效果。在油菜季中,秸秆处理土壤铵态氮含量最高($4.51 mg \cdot kg^{-1}$),较常规处理提高了 88.7%。且常规处理、优化处理和生物炭处理之间均无显著差异($P > 0.05$);同样在玉米季中,各施肥处理间土壤铵态氮含量亦无显著性差异($P > 0.05$)。试验小区中,不同处理下的玉米季土壤铵态氮含量均显著高于油菜季。

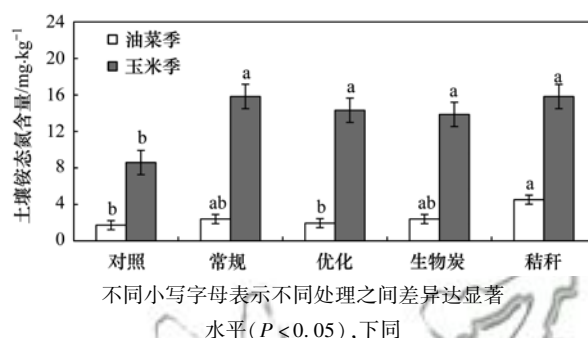


图 1 不同施肥处理下土壤铵态氮含量的变化

Fig. 1 Contents of soil ammonium nitrogen under different fertilization treatments

2.1.2 土壤硝态氮含量特征

化肥减量及配施有机肥可以有效提高土壤硝态氮含量。如图 2 所示,在油菜季中,秸秆处理土壤硝态氮含量最高($4.16 mg \cdot kg^{-1}$),是常规处理的 1.22 倍,而生物炭处理的增加量却低于常规处理;在玉米季中,优化处理以及配施生物炭和秸秆处理的土壤硝态氮均高于常规处理。相较于优化处理,秸秆和生物炭处理均未明显表现出增加土壤硝态氮含量的趋势。在试验小区中,各施肥处理下,玉米季的土壤硝态氮含量均高于油菜季。

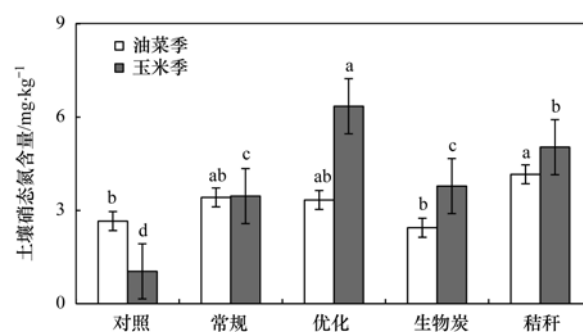


图 2 不同施肥处理下土壤硝态氮含量的变化

Fig. 2 Contents of soil nitrate nitrogen under different fertilization treatments

2.1.3 土壤碱解氮含量特征

如图 3 所示,在油菜季中,化肥减量配施有机肥的土壤碱解氮含量均高于常规处理。其中,秸秆处理下土壤碱解氮含量最高($41.11 mg \cdot kg^{-1}$),同时生物炭处理与常规处理比较土壤碱解氮的含量也有所提高。但各施肥处理间碱解氮含量差异不显著($P >$

0.05);在玉米季中,秸秆处理的土壤碱解氮含量最高($49.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),优化处理的土壤碱解氮含量最低($34.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).其中,秸秆处理和生物炭处理表现出土壤碱解氮增加的趋势,且较常规处理分别提高了12.6%和8.4%.在油菜季中,各处理的土壤碱解氮含量均高于玉米季.同样,化肥减量并配施生物炭和秸秆的处理均达到常规处理的土壤碱解氮含量的水平.

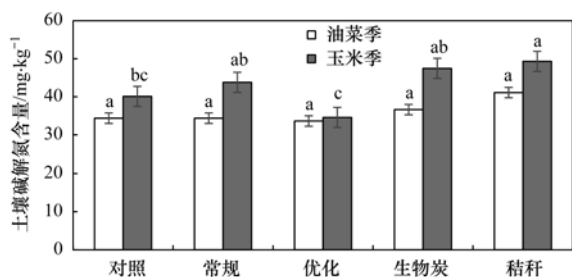


图3 不同施肥处理下土壤碱解氮含量的变化

Fig. 3 Contents of soil available nitrogen under different fertilization treatments

2.1.4 土壤全氮含量特征

如图4所示,在油菜季中,秸秆处理的土壤全氮含量表现为最高($0.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),并且显著高于其他处理($P < 0.05$),秸秆处理较常规处理显著提高了69.70%.而生物炭处理较常规处理提高33.33%;在玉米季中,秸秆处理的土壤全氮含量最高($0.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),较常规处理提高了7.14%,其次为生物炭处理($0.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其中秸秆处理和生物炭处理分别较优化处理提高了20%和14%.此外,玉米季的各处理的土壤全氮含量同样高于油菜季.除玉米季优化处理外,两季作物在化肥减量以及配施生物炭和秸秆处理下的土壤全氮含量均高于常规处理.

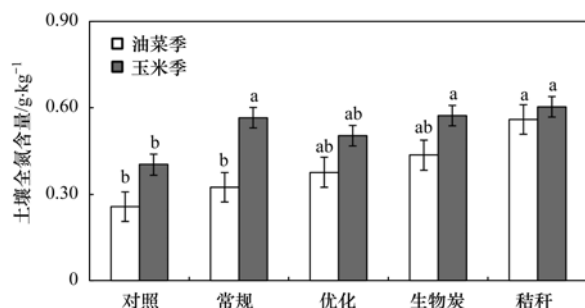


图4 不同施肥处理下土壤全氮含量的变化

Fig. 4 Contents of soil total nitrogen under different fertilization treatments

2.2 施肥对土壤磷素含量的影响

2.2.1 土壤有效磷含量特征

图5所示,在油菜季中,秸秆处理下的土壤有效磷含量达到最高($10.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).其中秸秆处理和生物炭处理分别较常规处理显著提高了128.7%和106.9%;在玉米季中,秸秆处理的土壤有效磷含量

达到最高水平($8.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为生物炭处理($6.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),生物炭和秸秆处理分别较常规施肥处理显著提高了31.84%和64.66%,而优化处理较常规处理含量显著降低了30.91% ($P < 0.05$).除常规处理外,油菜季各处理的土壤有效磷含量均高于玉米季.另外,化肥减量配施生物炭和秸秆处理也达到了有效提高土壤有效磷含量的目的.

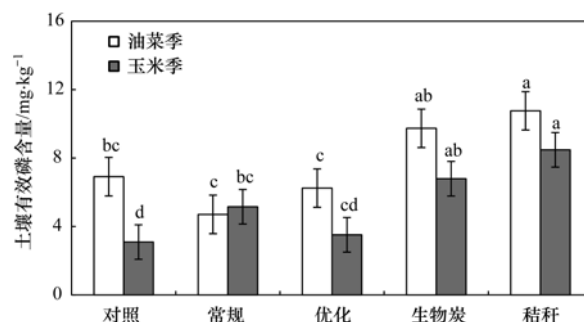


图5 不同施肥处理下土壤有效磷含量的变化

Fig. 5 Contents of soil available phosphorus under different fertilization treatments

2.2.2 土壤全磷含量特征

由图6可以发现,在油菜季中,优化施肥处理可以较常规处理显著有效地提高土壤全磷含量,并且含量表现最高($0.39 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),但其余各施肥处理之间差异不显著($P > 0.05$);在玉米季中,常规处理的土壤全磷含量最高($0.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),且各种优化、减量施肥配施生物炭和秸秆均未能达到常规施肥提供的全磷含量.但总体来说,化肥减量以及配施生物炭和秸秆处理的土壤全磷含量也和常规处理的施肥效果相近.

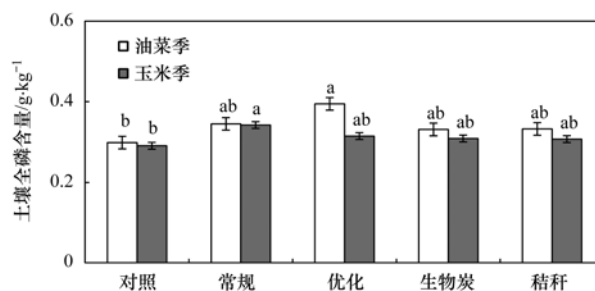


图6 不同施肥处理下土壤全磷含量的变化

Fig. 6 Contents of soil total phosphorus under different fertilization treatments

2.3 施肥对植株全氮、全磷含量的影响

2.3.1 植株全氮含量特征

从表2中可以看出,在油菜中,各处理籽粒的全氮含量均显著高于植株其他部位($P < 0.05$),且秸秆处理下含量最高($23.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),较常规处理提高了 $4.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.而在茎秆、根系和果壳和果荚部位常规处理的全氮含量均表现为最高,分别为3.46、3.04和 $5.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而各种优化、减量施肥

配施生物炭和秸秆均未能达到常规施肥提供的全氮含量. 在玉米中,全氮含量同样集中在玉米的籽粒部分. 优化处理的玉米籽粒全氮含量最高 (14.01 g·kg⁻¹),各施肥处理间并无显著差异;玉米根系和果壳/果荚的生物炭处理的全氮含量均表现为最高,

分别为 6.39 g·kg⁻¹和 4.97 g·kg⁻¹,均显著高于其他各处理. 从两种植株的全氮含量特征可以看出,各处理下,两种植株的全氮含量都主要集中在籽粒部位. 此外,化肥减量以及配施生物炭和秸秆处理的全氮含量均达到或超过常规处理的效果.

表 2 不同施肥处理下油菜和玉米的全氮含量/g·kg⁻¹

Table 2 Total nitrogen content of rapeseed and maize under different treatments/g·kg ⁻¹					
作物	处理	籽粒	茎秆	根系	果壳/果荚
油菜	对照	15.45 ± 1.15d	2.18 ± 0.16b	1.99 ± 0.15c	3.21 ± 0.31b
	常规	19.56 ± 2.19b	3.46 ± 0.21a	3.04 ± 0.14a	5.07 ± 0.48a
	优化	17.06 ± 2.21c	2.44 ± 0.57b	2.47 ± 0.08b	4.03 ± 1.16ab
	生物炭	16.25 ± 1.56cd	2.6 ± 0.14b	2.86 ± 0.23a	2.87 ± 0.19b
	秸秆	23.65 ± 1.81a	2.13 ± 0.12b	2.16 ± 0.13bc	3.89 ± 0.31ab
玉米	对照	8.38 ± 1.2d	2.91 ± 0.27e	2.91 ± 0.11d	2.66 ± 0.06c
	常规	13.77 ± 2.31ab	6.71 ± 1.23b	4.93 ± 0.25c	3.75 ± 0.43b
	优化	14.01 ± 2.53a	5.53 ± 0.74d	5.11 ± 0.47bc	4.45 ± 0.63ab
	生物炭	13.04 ± 2.03c	8.44 ± 0.64a	6.39 ± 0.27a	4.97 ± 0.78a
	秸秆	13.27 ± 0.92bc	5.87 ± 0.75c	5.41 ± 0.39b	3.96 ± 0.12b

1) 不同小写字母表示植株同一部位不同处理之间差异达显著水平 ($P < 0.05$),下同

2.3.2 植株全磷含量特征

从表 3 中可以看出,在油菜中,全磷含量主要集中在籽粒部分,其中生物炭处理的籽粒全磷含量最高(7.81 g·kg⁻¹),与常规处理相比提高了 23.58%,其他各处理间无显著差异性;常规处理下茎秆的全磷含量最高(2.58 g·kg⁻¹),是全磷含量最低(0.67 g·kg⁻¹)的秸秆处理的 2.85 倍;在根系的全磷含量中,生物炭处理含量最高(1.19 g·kg⁻¹),较常规处理显著提高了 15.53%,其余各处理间未达到显著水平;常规处理的果壳/果荚全磷含量最高(1.84 g·kg⁻¹),

除与秸秆处理差异不显著外,与其他各处理间均有显著性差异 ($P < 0.05$). 在玉米中,全磷含量同样集中在籽粒中. 其中,生物炭处理下的全磷含量表现为最高(3.21 g·kg⁻¹). 且在其余 3 个玉米植株部位生物炭处理的全磷含量均表现为最高,分别为 1.19、1.61 和 0.72 g·kg⁻¹. 同时,优化施肥和秸秆还田处理植株各部位的全磷含量也与常规处理相近. 总之,从两种植株的全磷含量特征可以看出,油菜和玉米的全磷含量都主要集中于籽粒中. 同时也可以看出化肥减量配施有机肥可以有效提高植株的全磷含量.

表 3 不同施肥处理下油菜和玉米的全磷含量/g·kg⁻¹

Table 3 Total phosphorus of rapeseed and maize under different treatments/g·kg ⁻¹					
作物	处理	籽粒	茎秆	根系	果壳/果荚
油菜	对照	6.29 ± 0.28b	1.53 ± 0.11c	0.70 ± 0.13b	1.03 ± 0.11c
	常规	6.32 ± 0.97b	2.58 ± 0.34a	0.60 ± 0.11b	1.84 ± 0.30a
	优化	6.03 ± 0.86b	1.9 ± 0.43ab	0.64 ± 0.08b	1.48 ± 0.16b
	生物炭	7.81 ± 0.93a	2.24 ± 0.23ab	1.19 ± 0.28a	1.08 ± 0.15c
	秸秆	6.43 ± 0.28b	0.67 ± 0.18d	0.79 ± 0.13b	1.71 ± 0.19ab
玉米	对照	2.45 ± 0.45b	1.35 ± 0.11a	1.59 ± 0.14a	0.84 ± 0.32a
	常规	2.9 ± 0.14ab	0.65 ± 0.05b	1.03 ± 0.09b	0.68 ± 0.07a
	优化	2.61 ± 0.08ab	0.84 ± 0.13b	0.86 ± 0.07bc	0.61 ± 0.04a
	生物炭	3.21 ± 0.21a	1.19 ± 0.12a	1.61 ± 0.16a	0.72 ± 0.05a
	秸秆	3.13 ± 0.16a	1.14 ± 0.16a	0.82 ± 0.04c	0.55 ± 0.05a

2.4 施肥对作物产量和肥料利用率的影响

2.4.1 施肥处理下作物产量特征

由表 4 可以看出,就油菜产量而言,各施肥处理中生物炭处理的油菜产量最高(2 328 kg·hm⁻²),较常规处理增产 5.1%. 各施肥处理均无显著差异性 ($P > 0.05$);就玉米产量而言,常规处理玉米产量最高(5 838 kg·hm⁻²),与各施肥处理相比提高了

5.46%~22.51%,但各施肥处理同样无显著差异性. 总体而言,化肥减量以及配施生物炭和秸秆处理能有效地达到减肥增产的效果.

2.4.2 施肥处理下肥料农学利用率特征

通过计算各施肥处理的肥料农学利用率发现(表 5),油菜季,各减量施肥处理均可提高氮肥和磷肥的利用率. 其中,生物炭处理肥料农学利用率提高

幅度最大,氮和磷利用率分别为 $14.85 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $23.76 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮肥和磷肥利用率分别较常规处理提高了 58.99% 和 52.60%。玉米季,秸秆处理的肥料利用率最高,氮和磷利用率分别为 $9.10 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.48 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮、磷肥利用率较常规处理分别提高了 99.12% 和 30.74%。总之,化肥减量以及配施生物炭和秸秆的油菜和玉米的肥料利用率普遍高于常规处理。

表 4 不同施肥处理下油菜和玉米产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

Table 4 Yields of rapeseed and maize and maize under different treatments/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理	油菜产量	玉米产量
对照	$813 \pm 59\text{b}$	$3\,446 \pm 623\text{b}$
常规	$2\,215 \pm 411\text{a}$	$5\,838 \pm 1\,064\text{a}$
优化	$2\,207 \pm 343\text{a}$	$5\,162 \pm 859\text{a}$
生物炭	$2\,328 \pm 372\text{a}$	$4\,765 \pm 897\text{a}$
秸秆	$1\,962 \pm 363\text{a}$	$5\,536 \pm 827\text{a}$

表 5 不同处理下油菜和玉米的肥料农学利用率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Agronomic fertilizer utilization efficiency of plants under different treatments for rapeseed and maize and maize/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	油菜		玉米	
	氮肥	磷肥	氮肥	磷肥
常规	9.34	15.57	4.57	15.94
优化	11.61	18.58	6.35	14.29
生物炭	14.85	23.76	5.75	12.93
秸秆	11.26	18.02	9.10	20.48

3 讨论

3.1 化肥减量有机替代对土壤氮磷的影响

氮素是植物在生长过程中需求量最大的元素之一,其含量高低是衡量土壤肥力的重要依据^[22]。化肥减量配施有机肥可以改善土壤养分^[23~24],张迎春等^[25]通过研究生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长情况及土壤理化性质的影响发现,生物有机肥替代化肥可以显著提高土壤氮素含量,改善莴笋根际土壤的理化性质。殷大伟等^[26]的研究表明生物炭基肥等量替代化肥可以增加土壤铵态氮和硝态氮的含量,达到减肥增效的效果。本试验结果表明,化肥减量配施生物炭和秸秆的土壤铵态氮、硝态氮、碱解氮和全氮含量普遍达到甚至超过常规处理,本研究认为化肥减量配施秸秆和生物炭可以提高土壤氮素的含量。其中秸秆处理的土壤氮素含量较常规处理有显著的增加,这是因为秸秆的含氮量高,在分解的过程中可以释放更多氮素,并且秸秆还田可以防止雨水冲击,阻挡雨水下渗从而降低地表径流和壤中流的径流量,使更多的氮素保存在土壤中,可以有效减少径流量,从而减少氮素流失,提高土壤氮素滞留时间^[27];化肥减量配施生物炭对土壤氮素增长的原因

在于生物炭可以改善土壤的通气状况,增加阳离子交换量,也可以促使土壤中氮的固定,减少氮素流失,提高氮素供应能力,从而增加土壤氮素含量^[28],另外生物炭具有丰富的孔隙度和较大的比表面积,因此具有较强的吸附性,可以有效吸附土壤中的氮素,减少氮素的淋溶,从而提高土壤氮含量,达到降低施肥成本、提高土壤氮素含量的要求^[28]。

土壤速效磷可以直接影响微生物的活性,进而对化肥养分的释放速率和强度造成影响^[29],黄绍敏等^[30]认为化肥减量配施秸秆可以降低土壤的固磷能力,提高土壤磷的有效性。本研究中化肥减量配施秸秆处理较常规处理能显著提高土壤有效磷含量,且达到最高水平,这与王秀娟等^[31]的研究结果一致,因为秸秆经过长期腐解,其内部易矿化的有机磷加速释放到土壤,提升了土壤有效磷的含量^[32]。同时,生物炭含有丰富的氮磷养分^[27],本试验化肥减量配施生物炭提高了土壤有效磷的含量。对于土壤全磷含量而言,化肥减量配施生物炭和秸秆处理较常规处理有所提高,这不仅验证了 Wang 等^[33]的研究结果,也说明化肥减量有机替代可以有效提高土壤全磷的含量,达到化肥减量和增效的目标。

3.2 化肥减量有机替代对作物养分及产量的影响

化肥减量配施有机肥不仅能提高作物的养分利用效率,减少肥料损失,还可以防止因化肥过量施用而造成的环境问题^[34]。本试验发现,化肥减量配施有机肥后,油菜和玉米的氮、磷含量均为籽粒部分最高,且秸秆还田的油菜籽粒较其他各处理的氮含量提高幅度最大,这与邬梦成等^[34]的研究结果相印证。生物炭处理明显提高了油菜和玉米籽粒的磷含量,这是因为生物炭本身含磷量较高且具有较强的吸附性,可以有效减少土壤磷素流失^[8]。作物养分的积累和分配因施肥方式不同而异,合理的施肥有利于作物养分的积累和高效利用。通过计算肥料农学利用率发现,油菜季,生物炭和施秸秆处理的氮肥、磷肥利用率均高于常规施肥处理,说明减量施肥配施生物炭或秸秆可以提高油菜的氮肥和磷肥利用率,这可能是由于生物炭和秸秆可以有效增加土壤氮素,改善土壤环境,促进土壤微生物的生长和繁殖,增加土壤微生物的生物量碳、氮以及土壤养分含量,提高相关酶的活性,从而增加油菜易吸收利用养分的转化量和转化速率,进而提高氮素和磷素的利用效率^[35,36]。李杰等^[37]的研究发现化肥减量配施有机肥可以提高作物氮、磷养分的利用率以及其积累量,与本文的研究结果一致。说明化肥减量配施有机肥可促进养分向有效态转化,提高土壤氮和磷养分含量,协调土壤养分平衡供应,对提高养分资源的利

用效率有显著作用。

化肥减量配施有机肥可以增加土壤氮、磷养分, 促进作物生长发育, 提高作物产量, 从而达到经济效益与环境效益的相统一。本研究发现, 化肥减量配施有机肥没有出现减产的现象, 甚至可以达到稳产以及略有增产的效果。黄容等^[5]的研究发现秸秆全量覆盖与化肥减量 20%~30% 配合使用, 可以提高水稻产量。另外, 有研究表明生物炭基肥与肥料混施也可以显著提高作物的产量^[38], 这和本研究结果基本一致。因此化肥减量配施有机肥技术能实现节约生产成本、保护生态环境、作物产量不减产的多重目标。

对肥料农学利用率与作物产量的相关关系分析

发现(表 6), 油菜产量和玉米产量都与氮肥、磷肥的肥料农学利用率显著相关($P < 0.05$), 这说明作物产量与氮肥、磷肥的施用量密切相关, 且油菜籽粒和玉米籽粒中全氮、全磷的含量都高于其他部位, 这和油菜、玉米在生长发育时籽粒部位对氮素、磷素的需求量较大有关, 氮肥和磷肥的施用可明显促进油菜生长发育, 能显著提高油菜和玉米的产量^[39,40]。同时, 化肥减量配施有机肥的肥料农学利用率也达到甚至高于常规施肥处理, 说明化肥减量配施有机肥可以提高作物对养分的有效吸收, 增加作物的产量。因此在种植油菜、玉米等作物的时候可以通过化肥减量合理搭配生物炭和秸秆来改善土壤质量、增强作物吸收养分能力、提高作物产量。

表 6 肥料农学利用率与作物产量的相关关系¹⁾

Table 6 Correlation between fertilizer utilization rate and crop yield

	N(油菜)	P(油菜)	N(玉米)	P(玉米)	油菜产量	玉米产量
N(油菜)	1	0.999 **	—	—	0.716 *	—
P(油菜)		1	—	—	0.745 *	—
N(玉米)			1	0.936 **	—	0.745 *
P(玉米)				1	—	0.740 *
油菜产量					1	—
玉米产量						1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

4 结论

三峡库区紫色土旱坡地在油菜/玉米轮作下, 通过化肥减量配施生物炭和秸秆能够有效提高土壤氮素和磷素含量, 同时提高油菜、玉米的产量和肥料农学利用率。其中, 化肥减量配施有机肥的作物产量普遍达到甚至超过常规处理的水平。化肥减量配施生物炭提高油菜肥料利用率最高; 秸秆处理提高玉米的肥料利用率最高。因此, 合理地进行化肥减量配施有机肥不仅能保证作物的稳产增产, 而且能降低环境污染的风险, 实现农业资源循环再利用。

参考文献:

[1] 袁嫚嫚, 邹刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 27-35.
Yuan M M, Wu G, Hu R, *et al.* Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, **2017**, **23**(1): 27-35.

[2] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, *et al.* Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, **174**(2): 105-112.

[3] Wei J, Wei Q, Qiang Z, *et al.* Evaluation of crop residues and manure production and their geographical distribution in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **188**: 954-965.

[4] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 添加不同外源氮对长期秸秆还田土壤中氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(7): 1107-1114.

Cong R H, Zhang L, Lu Y H, *et al.* Effect of adding different exogenous nitrogen sources on nitrogen transformation in long-term straw incorporated soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(7): 1107-1114.

[5] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4446-4456.
Hang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4446-4456.

[6] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, *et al.* Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch[J]. Agronomy Journal, 2006, **98**(4): 1128-1136.

[7] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤产甲烷菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(8): 2816-2828.
Wang M Y, Xu X P, Wang W Q, *et al.* Effects of slag and biochar amendments on methanogenic community structures in paddy fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(8): 2816-2828.

[8] Manna M C, Singh M V. Long-term effects of intercropping and bio-litter recycling on soil biological activity and fertility status of sub-tropical soils[J]. Bioresource Technology, 2001, **76**(2): 143-150.

[9] Alburquerque J A, Calero J M, Barrón V, *et al.* Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, **177**(1): 16-25.

[10] Jeffery S, Verheijen F G A, Van Der Velde M, *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. Agriculture,

- Ecosystems & Environment, 2011, **144**(1): 175-187.
- [11] 陈森, 邓晓, 李玮, 等. 不同施肥处理对辣椒产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(4): 104-107.
- [12] 陈正刚, 崔宏浩, 张钦, 等. 光叶苕子与化肥减量配施对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015, **37**(3): 411-416, 496.
- Chen Z G, Cui H H, Zhang Q, *et al.* Effects of burying *Vicia villosa* rothvar and chemical fertilizer reduction on soil fertility and corn yield [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, **37**(3): 411-416, 496.
- [13] 张星, 刘杏认, 张晴雯, 等. 生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(10): 1943-1950.
- Zhang X, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during Maize growth season in north China plain [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(10): 1943-1950.
- [14] 冯爱青, 张民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 159-164.
- Feng A Q, Zhang M, Lu Y Y, *et al.* Effects of controlled release nitrogen application rate and biochar on maize yield and soil biochemical properties [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(2): 159-164.
- [15] 刘园, Khan M J, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 849-858.
- Liu Y, Khan M J, Jin H Y, *et al.* Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 849-858.
- [16] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕和秸秆还田对土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 土壤通报, 2014, **45**(1): 85-90.
- Lu Y Q, Zhu A N, Zhang J B, *et al.* Effects of no-tillage and returning straw to soil on soil enzymatic activities and microbial population [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(1): 85-90.
- [17] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- Chen W L, Gao Y, Lin Y M, *et al.* Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [18] 潘玉蕊, 郑雅元, 陈林, 等. 化肥减量配施炭醋肥对烟草生长和品质的影响[J]. 现代园艺, 2018, **357**(9): 5-7.
- [19] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
- Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.
- [20] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 42-50.
- [21] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [22] 雷文琪, 张自翔, 张红梅, 等. 氯化钾和氯化钠浸提对比检测土壤中铵态氮的研究[J]. 南方农机, 2019, **50**(1): 43, 65.
- Lei W Q, Zhang Z X, Zhang H M, *et al.* Comparative research on determination of ammonium nitrogen in soil which extracted by potassium chloride and sodium chloride [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, **50**(1): 43, 65.
- [23] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(8): 1722-1728.
- Chen D L, Yi Z X, Zhou W X, *et al.* Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(8): 1722-1728.
- [24] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, **55**(1): 247-257.
- Cheng C, Wang J J, Cheng H H, *et al.* Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(1): 247-257.
- [25] 张迎春, 颀建明, 李静, 等. 生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(4): 196-205.
- Zhang Y C, Jie J M, Li J, *et al.* Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on asparagus lettuce and soil physical-chemical properties and microorganisms [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(4): 196-205.
- [26] 殷大伟, 金梁, 郭晓红, 等. 生物炭基肥替代化肥对砂壤土养分含量及青贮玉米产量的影响[J]. 东北农业科学, 2019, **44**(4): 19-24, 88.
- Yin D W, Jin L, Guo X H, *et al.* Effects of biochar based fertilizer on nutrient content and silage maize yield in sandy loam [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, **44**(4): 19-24, 88.
- [27] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- Huang R, Gao M, Li J C, *et al.* Effect of straw residues in combination with reduced fertilization rate on greenhouse gas emissions from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- [28] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, **39**(2): 278-284.
- Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. Earth and Environment, 2011, **39**(2): 278-284.
- [29] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 144-152.
- Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, **41**(1): 144-152.
- [30] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(1): 102-108.
- Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, *et al.* Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(1): 102-108.
- [31] 王秀娟, 解占军, 何志刚, 等. 秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, **47**(8): 39-44.
- Wang X J, Xie Z J, He Z G, *et al.* Effects of reducing phosphorus application on maize yield, phosphorus use efficiency

- and soil phosphorus content under straw returning condition[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, **47**(8): 39-44.
- [32] 孙伊辰, 廖文华, 汪红霞, 等. 秸秆还田下土壤磷、钾变化与产量效应[J]. *河北农业大学学报*, 2014, **37**(6): 7-12.
Sun Y C, Liao W H, Wang H X, *et al.* Straw management effects on soil phosphate and potassium contents and crop yield [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2014, **37**(6): 7-12.
- [33] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, **8**(3): 512-523.
- [34] 邬梦成, 李鹏, 张欣, 等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(1): 320-326.
Wu M C, Li P, Zhang X, *et al.* Effects of different organic matters application on nutrient absorption and utilization in rape and sweet potato rotation mode [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(1): 320-326.
- [35] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [36] 李银水, 鲁剑巍, 廖星, 等. 磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, **33**(1): 52-56.
Li Y S, Lu J W, Liao X, *et al.* Effect of phosphorus application rate on yield and fertilizer-phosphorus utilization efficiency in rapeseed [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, **33**(1): 52-56.
- [37] 李杰, 贾豪语, 颀建明, 等. 生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J]. *草业学报*, 2015, **24**(1): 47-55.
Li J, Jia H Y, Jie J M, *et al.* Effects of partial substitution of mineral fertilizer by bio-fertilizer on yield, quality, photosynthesis and fertilizer utilization rate in broccoli [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(1): 47-55.
- [38] Smebye A, Alling V, Vogt R D, *et al.* Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 100-105.
- [39] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(2): 189-195.
Zhang H Y, Zhang J, Zhang F L, *et al.* Effects of different phosphorus fertilizers on soil phosphorus availability and maize yield under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(2): 189-195.
- [40] 王建红, 张贤, 李增强, 等. 有机肥在油-稻轮作田块对油菜生长和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (4): 31-36.
Wang J H, Zhang X, Li Z Q, *et al.* Effects of organic fertilizer on rape growth and soil fertility in rape-rice rotation field [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017, (4): 31-36.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)