

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 ..... 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 ..... 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 ..... 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 ..... 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 ..... 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 ..... 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 ..... 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 ..... 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 ..... 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 ..... 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 ..... 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 ..... 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 ..... 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 ..... 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 ..... 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 ..... 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 ..... 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 ..... 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 ..... 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 ..... 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 ..... 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 ..... 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 ..... 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附  $Pb^{2+}$  的性能 ..... 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电催化矿化吡啶的影响与机制 ..... 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 ..... 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 ..... 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 ..... 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 ..... 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 ..... 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 ..... 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 ..... 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 ..... 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 ..... 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放的影响 ..... 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 ..... 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 ..... 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 ..... 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 ..... 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 ..... 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 ..... 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 ..... 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 ..... 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

*Pantoea* sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化 ..... 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 ..... 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 ..... 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 ..... 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 ..... 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 ..... 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

# 碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响

俞映惊<sup>1,2</sup>, 杨林章<sup>1</sup>, Alfred Oduor Odindo<sup>2</sup>, 薛利红<sup>1\*</sup>, 何世颖<sup>1</sup>, 段婧婧<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 夸祖鲁-纳塔尔大学, 农业、地球与环境科学学院, 南非斯科茨维尔 3209)

**摘要:** 针对太湖地区稻田改种菜地后带来的土壤酸化现象, 以碳酸钙与生物炭作为酸化改良剂, 开展室内培养及多次淋洗模拟试验, 比较两种改良剂对酸化菜地土壤持氮能力及酸化修复效果的影响。结果表明, 基于碱缓冲曲线法, 本试验用酸化菜地土壤每提高 1 个 pH 单位需向土壤中添加碳酸钙  $3.92 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$  或生物炭  $27.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。无外源氮条件下碳酸钙添加使土壤氮矿化速率显著提高了 37%, 对土壤铵态氮、硝态氮含量影响不显著; 生物炭添加使土壤氮矿化速率显著提高了 35% ~ 44%, 且显著增加了土壤硝态氮含量 42% ~ 58%。模拟淋洗下, 生物炭添加显著消减渗滤液体积 24%, 渗滤液氮浓度 45%, 显著减少氮淋失量 42% ~ 57%, 而碳酸钙添加对渗滤液体积没有影响, 增加了渗滤液中氮浓度, 氮淋失量增加了 12% ~ 76%。淋洗后, 各处理土壤 pH 值发生不同程度的降低, 无外源氮条件下添加碳酸钙处理土壤 pH 值降幅最低, 外源氮添加条件下生物炭添加处理降幅最低。由此可见, 碳酸钙对酸化土壤修复效率较高, 但在外源氮添加条件下降低了土壤持氮能力, 更适用于酸化严重且需要休耕改良的菜地土壤; 生物炭在维持土壤 pH 值的同时可以有效提高土壤矿质氮留存量, 降低氮淋失, 更适用于仍在高强度种植的菜地土壤。

**关键词:** 酸化菜地土壤; 持氮能力; 碳酸钙; 生物炭; 氮淋失

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3851-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702194

## Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil

YU Ying-liang<sup>1,2</sup>, YANG Lin-zhang<sup>1</sup>, Alfred Oduor Odindo<sup>2</sup>, XUE Li-hong<sup>1\*</sup>, HE Shi-ying<sup>1</sup>, DUAN Jing-jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Environment of the Lower Reaches of the Yangtze River, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Agricultural, Earth & Environmental Sciences, University of KwaZulu-Natal, Scottsville 3209, South Africa)

**Abstract:** In Taihu Lake region, more and more paddy fields are being converted to vegetable fields, which cause serious soil acidification and decreased soil nitrogen retention. In this study, calcium carbonate and biochar were used as acidification amendments to test their ability on soil acidification remediation and soil nitrogen retention improvement. Calcium carbonate and biochar addition rates were determined by pH buffering curves. An incubation experiment with and without nitrogen fertilization and multi-leaching simulation tests were conducted. The soil nitrogen mineralization rate, dynamics of the nitrogen content in soils and leachates, and soil pH were measured. The results showed that  $3.92 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$  calcium carbonate and  $27.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  biochar should be added into the tested acidified vegetable soil to recover the original pH value. Without nitrogen fertilization, the addition of calcium carbonate increased the soil nitrogen mineralization rate by 37% but had no significant effect on mineral nitrogen content. However, biochar addition significantly improved the soil nitrogen mineralization rate by 35% - 44% and nitrate content by 42% - 58%. Nitrogen leaching loss was cut down by 42% - 57% in biochar addition treatment because of the lower leachate volume and nitrogen concentration, while calcium carbonate addition increased nitrogen leaching loss by 12% - 76% because of the higher leachate nitrogen concentration. After leaching, the soil pH decreased for all the treatments. The soil pH change was the lowest for calcium carbonate addition treatment under no nitrogen fertilization and the lowest for biochar addition treatment under nitrogen fertilization. This result suggests that calcium carbonate is more applicable for seriously acidified soils which are fallowed and biochar is more suitable for the intensified vegetable fields because it can improve the soil nitrogen retention and soil pH, and reduce the nitrogen leaching loss.

**Key words:** acidified vegetable soil; soil nitrogen retention; calcium carbonate; biochar; nitrogen leaching

农业土壤的持氮能力是决定系统能否持续发展的关键。农业生态系统作为半开放的生态系统, 较其他自然系统受人为活动影响更为强烈。同种土壤条件下, 种植作物与耕作方式的不同以及施肥强度的差异都会直接影响到土壤持氮能力及系统稳定性。而种植作物的改变又是耕作方式及施肥强度产

收稿日期: 2017-02-27; 修订日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501320); 国家重点研发计划项目(2016YFD0801101); 公益行业(农业)科研专项(201503106)

作者简介: 俞映惊(1986~), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为农田养分循环、面源污染, E-mail: yu.colleen@gmail.com

\* 通信作者, E-mail: njxuelihong@gmail.com

生差异的诱因。以太湖地区为例,作为享誉中外的鱼米之乡,稻米的耕作超过千年历史,而近 20 年水稻耕作面积却不断缩小,除建设用地占用以外,种植作物的改变也是主要原因之一。经济发展带来人们对膳食多样化要求的提高,驱动着农务者将传统稻田改为菜地(“稻改菜”)[1]。

菜地的耕作模式与传统稻田截然不同。当前条件下,太湖地区单季水稻或小麦的氮肥平均施用量在  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [2],年投入量在  $600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,而单季蔬菜种植的氮肥施用量在  $300 \sim 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,年平均种植 3~5 茬,年投入量在  $800 \sim 1\,300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  以上[3,4]。尿素、复合肥及有机肥是太湖地区普遍施用的氮肥形态。氮肥进入菜地土壤后发生硝化作用,带来了大量  $\text{H}^+$  的释放[5],虽然蔬菜对氮素的吸收可以中和部分  $\text{H}^+$ ,但当施用量高于蔬菜生长所需时, $\text{H}^+$  被留存在土壤中。研究证实,菜地系统施氮量通常高出蔬菜生长需要量的 6~8 倍[6,7],蔬菜对当季化肥氮利用效率在 14.6%~42.5% 之间[7,8],菜地土壤中硝态氮的残留量是农田土壤的 5~6 倍[9]。蔬菜根系浅,养分多集中于土壤表层,而太湖地区地下水位普遍较高,且年降水量超过 1 000 mm,极易发生淋失[10],硝态氮被水带走的同时,Ca、Mg 等碱基离子也随之流失,胶粒中易发生  $\text{H}^+$  置换碱基离子的情况,进一步加速了土壤的酸化进程[11]。稻田淹水状态下土壤 pH 值会有所回升[12],而菜地土壤不会经历干湿交替的水分过程,土壤 pH 值更易发生变化。尹睿等[13]研究发现稻田改种蔬菜后的土壤铵态氮含量平均上升 21 倍,硝态氮平均上升 22 倍,且土壤酸化趋势显著,pH 降低了 0.7 个单位。这种“高投入,高产出,高收益”的耕作模式,带来了严重的土壤酸化,降低了蔬菜的氮素利用率,增加了矿质氮的土壤残留及淋失风险[3,10,14],严重影响了菜地土壤的持氮能力,成为威胁菜地土壤健康及持续发展的最主要因素之一。

碳酸钙是石灰类改良剂之一,与生石灰( $\text{CaO}$ )、熟石灰[ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]等相比,碳酸钙降酸强度较为缓和,不易引起土壤 pH 值的突变[15],因此被广泛应用于土壤 pH 值的调节;同时碳酸钙的添加也可以补充土壤中钙盐[16],增加土壤胶黏性,改善土壤结构。生物炭是近些年较为热门的土壤改良剂,它取材于农作物的废弃部分,原料多且易得;热裂解生产的生物炭性状稳定,呈碱性[17],因而被期待用于酸性土壤的改良。此外,生物炭具有多孔特性,可有效增加土壤保持水分和养分的能力[18~20];生物炭

的添加会改变土壤中氮素转运途径[21,22],多方共同作用使得生物炭对酸化土壤持氮能力的影响存在不确定性。目前,我国利用生物炭修复酸化土壤的研究刚刚起步[23],如何确定生物炭的适宜添加比例尚无相关标准或方法。确定“石灰需求量”的常规方法有:SMP 单缓冲法、SMP 双缓冲法、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  滴定法等[24],均是根据化学溶剂在短时间内对土壤 pH 值的影响而确定需求量的简便计算方法,但并不完全适用于降酸效果较为缓和的改良剂。生物炭虽显示为碱性,却也保留着生物质的钝性,添加后并不会像化学溶剂一样迅速带来土壤 pH 值的突变,寻找合适方法量化修复酸化土壤的“生物炭需要量”是实现两种改良剂效果比较的前提。

因此,本研究以太湖地区因“稻改菜”而发生酸化的菜地土壤作为供试土壤,以碱缓冲曲线为标准、稻田土壤 pH 值为目标修复数值,分别确定碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤修复的添加量;比较两种改良剂对菜地土壤持氮能力的影响;考察添加两种改良剂条件下,淋洗发生后土壤 pH 值的稳定性;以期期为碳酸钙与生物炭用于酸化菜地土壤修复提供数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试供土壤

供试土壤取自江苏宜兴市丁蜀镇漳溇村( $\text{N } 31^{\circ}18'24''$ , $\text{E } 119^{\circ}54'41''$ ),该地区属于长江三角洲太湖流域,年均温  $15.7^{\circ}\text{C}$ ,平均降水 1 100 mm。当地土壤多为湖积形成,土壤类型为湖白土。按试验所需,分别采集长期耕作的稻田以及“稻改菜”菜地的同源土壤样本,理化性质见表 1。其中,采集的稻田土壤已具百年种植历史,且近 20 年一直保持稻-麦两季的耕作模式,以尿素及复合肥( $\text{N}:\text{P}:\text{K}=15:15:15$ )为主要氮肥类型,每季分 3~4 次施入田间,年氮肥投入量在  $500 \sim 600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;采集的菜地土壤取自 2005 年“稻改菜”田块,以尿素及有机肥(非商品有机肥,多为农家肥)为主要氮肥类型,平均年种植叶菜 3~4 季,每季施入氮肥 1~2 次,年氮肥投入量在  $900 \sim 1\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;两种地块均存有犁底层,约距地表 17 cm,土壤样品采集于犁底层以上的表层土。

### 1.2 碳酸钙与生物炭添加比例的确定

尝试以土壤的直接需求量为依据,直接以碳酸钙与生物炭作为添加物,结合 Tarkalson 土壤缓冲容量测定方法[25,26],作出土壤碱缓冲曲线,确定各改良剂添加比例。

表 1 两种土壤样品的理化性质

项目	菜地土壤	稻田土壤
pH	6.40 ± 0.03	6.88 ± 0.04
阳离子交换量 × 10 <sup>-2</sup> /mol·kg <sup>-1</sup>	9.14 ± 1.20	12.35 ± 0.84
矿质氮含量/mg·kg <sup>-1</sup>	83.66 ± 5.96	34.83 ± 7.67
Olsen 磷含量/mg·kg <sup>-1</sup>	104.14 ± 17.68	68.02 ± 8.50
有机质含量/g·kg <sup>-1</sup>	18.52 ± 3.04	21.57 ± 1.55
土壤饱和含水量/%	43.17 ± 1.81	45.84 ± 2.46

### 1.2.1 培养样品的准备

取 40 份菜地土壤风干样品, 每份 50 g, 过 40 目筛(0.425 mm), 分别放入塑封袋. 其中 20 份菜地土壤样品添加 CaCO<sub>3</sub> 悬浊液, 添加比例分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 × 10<sup>-2</sup> mol·kg<sup>-1</sup> 土壤; 另外 20 份菜地土壤样品加入过 40 目筛的生物炭, 添加比例为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 × 10 g·kg<sup>-1</sup> 土壤, 每个处理 4 次重复; 剩下 10 份菜地土壤样品仅添加去离子水, 各处理添加或补充至同等水量, 混匀, 密封, 20℃ 避阴保存一个月<sup>[25,26]</sup>.

### 1.2.2 碱缓冲线的绘制

培养后, 各处理土壤样品风干, 测定土壤 pH 值(2.5:1, 水:土), 并以 pH 值为纵坐标, 碳酸钙与生物炭的添加比例为横坐标作图, 对不同处理土壤进行一元方程拟合, 形成碱缓冲线(图 1).

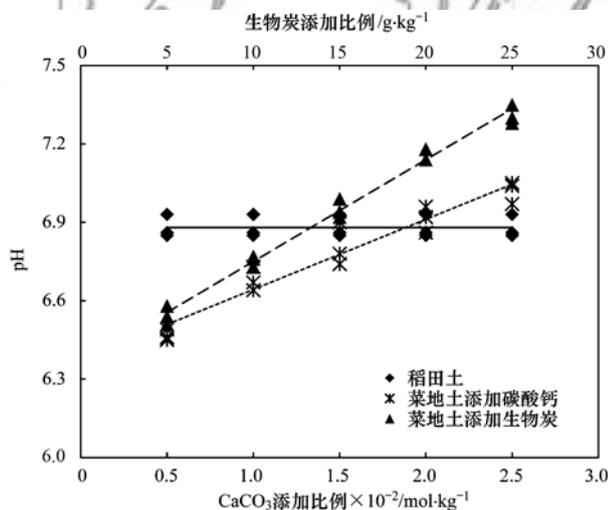


图 1 不同改良剂添加比例下土壤的碱缓冲曲线

Fig. 1 Soil titling curves with different amendments

### 1.2.3 添加比例的确定

根据两种添加菜地土碱缓冲曲线, 确定当前条件下菜地土壤 pH 由 6.40 调整到原稻田土壤的 pH 值水平 6.88, 需要添加碳酸钙 1.88 × 10<sup>-2</sup> mol·kg<sup>-1</sup> 或生物炭 13.31 g·kg<sup>-1</sup>, 即每增加 1 个 pH 单位, 需添加碳酸钙 3.92 × 10<sup>-2</sup> mol·kg<sup>-1</sup> 或生物炭 27.73

g·kg<sup>-1</sup>.

## 1.3 试验处理及土壤持氮能力的测试

### 1.3.1 试验处理及土壤样品培养

试验采用 4 种土壤样品: 菜地土壤、添加碳酸钙的菜地土壤(碳酸钙添加量为 1.88 × 10<sup>-2</sup> mol·kg<sup>-1</sup>)、添加生物炭的菜地土壤(生物炭添加量为 13.31 g·kg<sup>-1</sup>)以及稻田土壤; 2 个外源氮添加水平: 氮添加(纯氮 100 mg·kg<sup>-1</sup>)以及无氮添加, 共计 8 个处理, 分别为: 稻田土壤处理(PS)、菜地土壤处理(VS)、添加生物炭的菜地土壤处理(VS + BC)、添加碳酸钙的菜地土壤处理(VS + CA)、添加外源氮的稻田土壤处理(PS + N)、添加外源氮的菜地土壤处理(VS + N)、添加外源氮和生物炭的菜地土壤处理(VS + BC + N)、添加外源氮和碳酸钙的菜地土壤处理(VS + CA + N). 每个处理设置 4 个重复, 共 32 份样品. 每份样品取风干过 40 目筛土壤 1 kg, 添加碳酸钙或生物炭并拌匀, 压实灌入直径为 10 cm 的圆柱形 PVC 管套中(土层高度约 12 ~ 14 cm), 管套下端用双层 200 目筛网封口, 防止土壤掉落. 外源氮采用尿素, 配置成 250 mL 溶液后进行添加, 其他处理补充离子水至同等水量, 分别称取总重, 记录为“初始重量”. 以后每 3 d 补充一次水分, 使各处理维持在初始重量. 20℃ 恒温培养 105 d, 每 35 d(普通叶菜的平均种植周期为 35 d)为一个周期, 整个培养过程为 3 个周期.

### 1.3.2 土壤样品的采集与测定

分别在培养的第 3、35、70 和 105 d, 从管套土壤表层钻取 20 g 样品用于土壤 pH、矿质氮含量以及含水量的测定, 其中第 3 d 的样品相关指标数据作为初始参考.

### 1.3.3 淋洗过程模拟与样品采集测定

采用模拟浇灌方式, 在每个周期的第 10、20 及 30 d 分别进行 1 次淋洗, 整个培养周期共计模拟淋洗 9 次. 每次模拟淋洗前, 对各样品分别补充离子水至“初始重量”, 再分别浇灌 350 mL 水(补充水分至土壤重量 60%)进行淋洗. 浇灌分少量多次进行(约 10 次), 以不产生短时间土壤表层积水为准, 尽可能避免液体沿 PVC 套管内壁流下. 每个套管下方放置一烧杯收集渗滤液, 在浇灌完成后 4 h, 测量烧杯中渗滤液的体积及其中总氮浓度.

### 1.3.4 土壤及渗滤液相关氮含量(或浓度)的测定方法

土壤矿质氮含量测定: 准确称取新鲜土壤后, 按

照比例(10:1, KCl 溶液:土)与  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl 溶液混合,振荡 60 min,进行矿质氮浸提,过滤后使用流动分析仪(Skalar San++)测定浸提液中铵态氮及硝态氮的含量.同时,称量一定重量鲜土,105℃烘干至恒重,计算土壤含水量,并将浸提液各形态矿质氮含量数据进行水分差异折算.

渗漏液总氮浓度测定:过滤收集的渗漏液,使用流动分析仪(Skalar San++)测定浸提液中总氮浓度.

#### 1.4 碳酸钙与生物炭对菜地土壤酸化修复稳定性的检测

培养 105 d 后,风干土壤,再次测量土壤 pH 值(2.5:1,水:土),比较两种改良剂及外源氮添加对土壤 pH 值的影响.

#### 1.5 数据计算与处理

##### 1.5.1 氮淋失量的计算

分别计算每个样品的单次(整个培养周期共计模拟淋洗 9 次)淋失氮损失量 [ $m_{(k)}$ , mg,  $k$  为 1~9, 计算见式(1)],将累计淋失氮损失量作为该处理整个培养周期淋失氮损失量 [ $m_{(\text{total})}$ , mg, 计算见式(2)].

$$m_{(k)} = c_{(k)} \times v_{(k)} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中,  $c_{(k)}$  指检测得到的渗漏液总氮浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $v_{(k)}$  渗漏液体积 (mL).

$$m_{(\text{total})} = \sum_{k=1}^9 m_{(k)} \quad (2)$$

##### 1.5.2 土壤氮矿化速率的估算

将每个培养样品视为一个小体系,在假设不发生氮素气态损失的前提下,则该体系中矿质态氮存在如下平衡:

$$m_{(\text{input})} + m_{(\text{original})} + m_{(\text{mineralized})} = c_{(\text{mineral N})} m_{(\text{soil})} + m_{(\text{loss})} \quad (3)$$

式中,  $m_{(\text{input})}$  指外源氮添加量 (mg);  $m_{(\text{original})}$  指原始土壤矿质氮量 (mg);  $m_{(\text{mineralized})}$  指新增土壤矿化产氮量;  $c_{(\text{mineral N})}$  指培养后土壤矿质氮含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $m_{(\text{soil})}$  指培养土壤重量 (kg);  $m_{(\text{loss})}$  指氮淋失量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 其中  $m_{(\text{mineralized})}$  是唯一不可直接获取数据,可通过等式差值计算得到,且:

$$m_{(\text{mineralized})} = v_{(\text{mineralized})} \times t_{(\text{mineralized})} \quad (4)$$

式中,  $v_{(\text{mineralized})}$  指土壤氮矿化速率 [ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ];  $t_{(\text{mineralized})}$  指培养时长 (d).

得到:

$$v_{(\text{mineralized})} = [c_{(\text{mineral N})} m_{(\text{soil})} + m_{(\text{loss})} - m_{(\text{input})} - m_{(\text{original})}] / t_{(\text{mineralized})} \quad (5)$$

##### 1.5.3 数据处理

土壤中氮转运及淋失相关数据均以单个培养样品为计算体系.其中土壤矿质氮含量以 35 d 为一个采样间隔获得变化曲线;氮矿化速率以整个培养期作为计算时段;渗漏液矿质氮浓度以及渗漏液体积以单次淋洗发生为计算基础,而土壤 pH 值仅基于整个培养期结束后样品数据,通过 4 个重复统计分析相关数值.采用 SPSS 中 Duncan 法对数据进行差异显著性分析 ( $P < 0.05$ );采用 Microsoft Excel 软件对数据进行统计、制图.

## 2 结果与分析

### 2.1 碳酸钙与生物炭添加对土壤持氮能力的影响

#### 2.1.1 土壤淋失氮损失量

“稻改菜”后,土壤的持水能力显著降低,在同样浇灌水量下,菜地土壤的渗漏液平均体积较稻田土壤增加了 31% [图 2(a)].生物炭的添加显著提高了菜地土壤的持水能力,渗漏液平均体积降低了 24%,与稻田土壤相近;而碳酸钙的添加对菜地土壤渗漏液体积没有显著影响.

如图 2(b) 所示,培养周期中多次模拟淋洗的渗漏液氮浓度变化较大.无外源氮添加条件下,菜地土壤与稻田土壤的渗漏液平均氮浓度在  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,差异不大;生物炭的添加降低了渗漏液氮浓度,但差异不显著,碳酸钙的添加使渗漏液平均氮浓度显著提高了 77%.外源氮添加条件下,菜地土壤的渗漏液氮平均浓度比稻田土壤高 19%;菜地土壤添加生物炭后渗漏液平均氮浓度降低了 45%,添加碳酸钙后则增加 11%,但所有处理间均未达到统计学显著差异水平.

105 d 的培养期内每千克土壤氮淋失量在 15~60 mg 之间图 2(c),处理间差异较大.“稻改菜”后,土壤氮淋失量分别增加了 32% (无外源氮添加)及 52% (有外源氮添加).菜地土壤添加生物炭后氮淋失量较原菜地土壤减少了 42% (无外源氮添加)及 57% (有外源氮添加),添加碳酸钙则增加了氮淋失量 76% (无外源氮添加)及 12% (有外源氮添加).

#### 2.1.2 土壤矿质氮含量

稻田与菜地土壤样品虽然在培养初期铵态氮含量差异较大,但培养 105 d 后铵态氮含量相近 [图 3(a)和 3(b)].菜地土壤添加生物炭后土壤铵态氮含量有一定提高,在无外源氮添加条件下表现更为显著 [图 3(a)];而碳酸钙添加则降低了添加外源氮土壤中铵态氮的含量 [图 3(b)].四种土壤处理

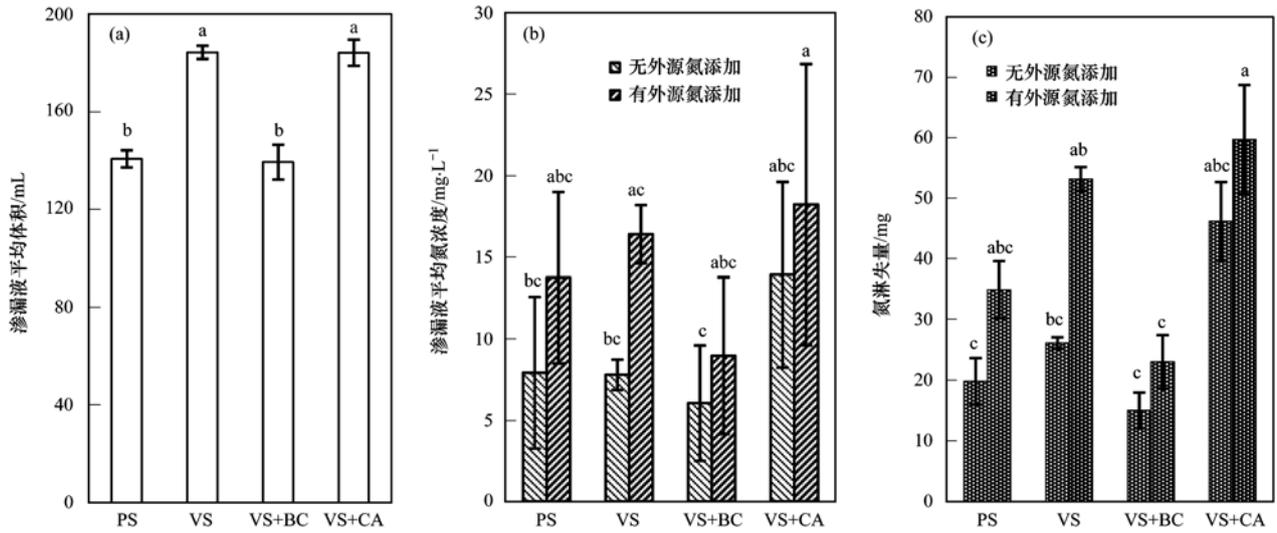
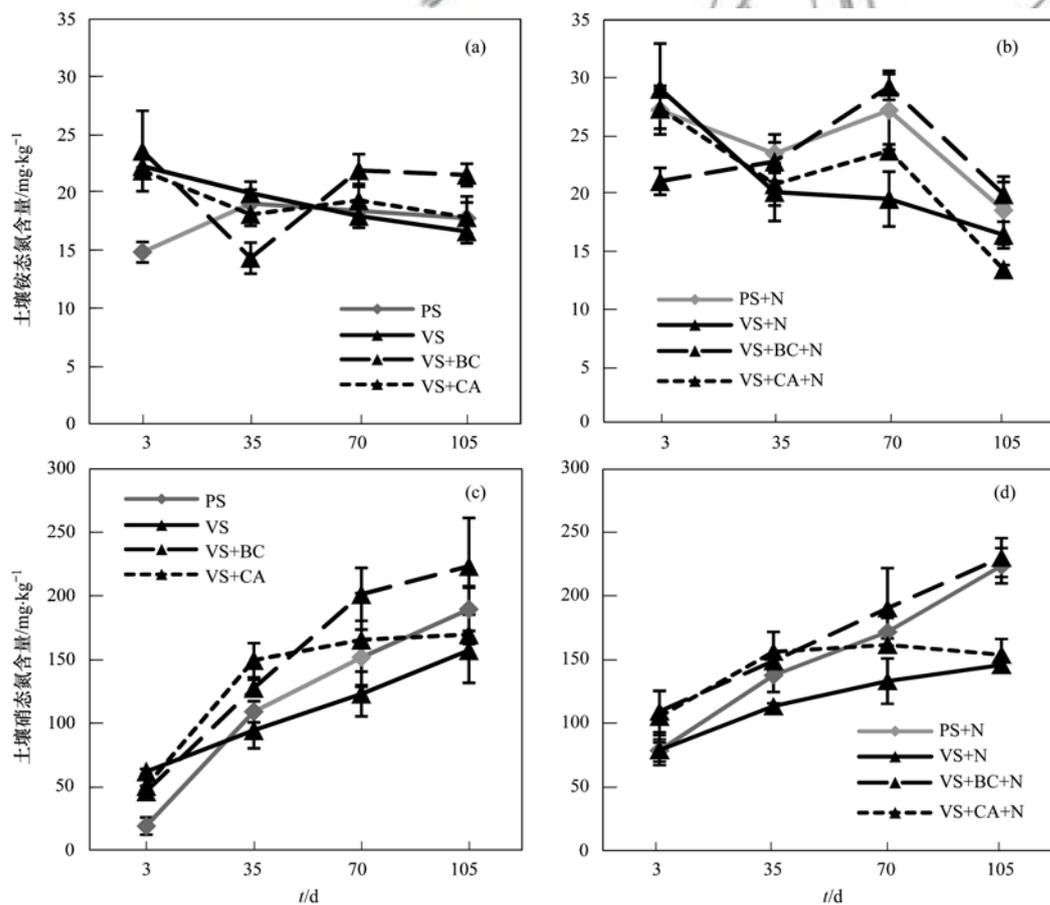


图2 不同处理的渗漏液平均体积、渗漏液平均氮浓度和氮淋失总量

Fig. 2 Average leachate volume, nitrogen concentration in leachate and the total nitrogen leached under different treatments

的铵态氮含量在整个培养过程中均不超过 35 mg·kg<sup>-1</sup>, 硝态氮的含量在 157 ~ 269 mg·kg<sup>-1</sup> 间, 且随着培养时间的增加而呈现不断增加的趋势[图 3

(c) 和 (d)]. 生物炭添加增加了菜地土壤硝态氮含量, 无外源氮添加条件下提高 42%, 外源氮添加条件下提高了 58%。而碳酸钙添加与对菜地土壤硝态



(a) 无外源氮添加条件下土壤铵态氮含量, (b) 有外源氮添加条件下土壤铵态氮含量, (c) 无外源氮添加条件下土壤硝态氮含量, (d) 有外源氮添加条件下土壤硝态氮含量

图3 土壤矿质氮含量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of mineral nitrogen content in soil

氮无较大影响。

### 2.1.3 土壤氮矿化速率

土壤中矿质氮的主要来源除了外源氮的添加就是土壤本身有机态氮的矿化。在不计算培养过程中氮气态损失的条件下,假设本研究中氮处于平衡状态[公式(3)],计算出各土壤样品在不同外源氮条件下培养期间的氮矿化速率(表2)。稻田土壤氮矿化速率显著高于菜地土壤,添加外源氮降低了土壤氮矿化速率25%~54%。不施氮情况下,添加生物炭和碳酸钙均显著提高了菜地土壤氮矿化速率,增幅35%~38%,两者差异不显著。在外源氮添加条件下,生物炭和碳酸钙添加也都提高了土壤氮矿化速率,生物炭添加处理提高了44%,差异显著,而碳酸钙添加处理提高效果不显著。

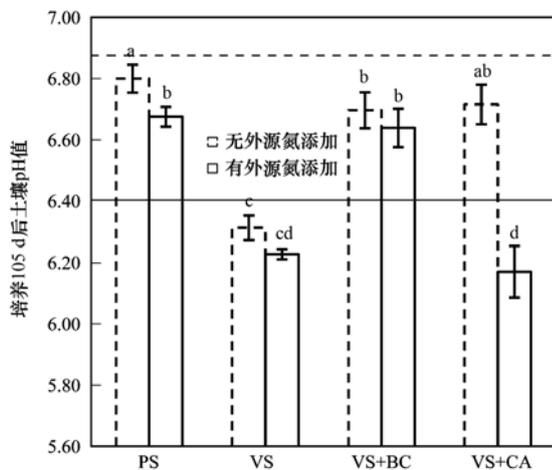
表2 土壤氮矿化速率/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

Table 2 Soil nitrogen mineralization rates/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

项目	无外源氮添加	有外源氮添加
PS	2.02 ± 0.16 a	1.58 ± 0.13 bc
VS	1.36 ± 0.03 cd	1.04 ± 0.08 d
VS + BC	1.84 ± 0.37 ab	1.50 ± 0.17 bc
VS + CA	1.87 ± 0.39 ab	1.23 ± 0.10 cd

### 2.2 培养后土壤 pH 值的变化

原稻田土壤(pH 6.88)与菜地土壤的 pH(pH 6.40)相差 0.48 个单位。培养前,两种改良剂添加量的确定以调节至稻田土壤 pH 为准,在不添加外源氮的条件下,发生 9 次淋洗后,添加碳酸钙和生物炭的菜地土壤处理 pH 值降低了 0.16~0.18 个单位,两者差异不显著,但显著低于稻田土壤(图4)。外源氮添加使各土壤样品的 pH 值降低了 0.06~0.55 个单位,除生物炭添加处理外,其他处理变化



虚线为培养前稻田土壤 pH 值,实线为培养前菜地土壤 pH 值

图4 培养 105 d 后土壤 pH 值

Fig. 4 Soil pH value after 105d incubation

均达到显著水平,尤其是添加碳酸钙的菜地土壤处理,淋洗后土壤 pH 值与未添加改良剂的菜地土壤无较大差异。

## 3 讨论

酸化原本是土壤缓慢变化的自然过程,而以产氮为目的的化肥氮施用大大加速了这一进程<sup>[27,28]</sup>。另一方面,土壤酸化也反向作用到土壤氮素转运上,影响到土壤持氮能力,最终反映在目标作物产量与化肥氮需求的数量关系上<sup>[29,30]</sup>。本研究以同等外源氮添加条件下氮淋失量以及土壤留存量作为土壤持氮能力的衡量标准,考察两种改良剂在修复土壤酸化同时对土壤持氮能力的影响,同时将淋洗前后土壤 pH 值的稳定性作为验证改良剂修复酸化效果的一个指标,综合比较两种改良剂的作用效果及适用条件。

### 3.1 氮淋失与土壤留存

硝态氮是氮淋失的主要形态(渗漏液中硝态氮比例超过 60%),两种改良剂添加以提高土壤 pH 值为目的,将一定程度增加土壤硝化速率<sup>[31]</sup>以及氮淋失的风险。如图 2(b)所示,菜地土壤添加碳酸钙显著提高了渗漏液氮浓度,尤其是在不添加外源氮条件下,而对渗漏液体积并没影响,因此氮淋失增加[图 2(c)]。碳酸钙添加处理(VS + CA)提高了氮矿化速率(表 2),而淋洗后土壤中铵态氮含量并未有显著升高[图 3(a)],硝态氮含量呈现前期显著增加后期变缓的趋势[图 3(c)],推测碳酸钙添加处理中较高的渗漏液氮浓度主要来源于矿化作用铵态氮底物的提供以及硝化速率的提升。而生物炭对渗漏液体积及渗漏液中氮浓度的消减效果都很明显。图 3 中,培养结束时,生物炭添加处理土壤的铵态氮和硝态氮含量均高于其他处理,暗示了生物炭能够一定程度增大土壤中矿质氮留存。但以往关于生物炭在土壤中氮吸附的结果显示<sup>[19,20]</sup>,在本研究的生物炭添加比例下,生物炭直接吸收而固定的氮量不足以使土壤中矿质氮量增加如此大比例,因此推测土壤结构的改变才是生物炭提高土壤矿质氮留存量的主要途径<sup>[16,23]</sup>。

本研究中,4 个土壤样品(稻田土壤,菜地土壤,添加生物炭的菜地土壤和添加碳酸钙的菜地土壤)添加外源氮  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  后,经过 105 d 的培养,土壤矿质氮含量仅增加了  $6 \sim 73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。主要是因为:①外源氮施用降低了土壤本身氮矿化速率(表 2);② 8%~27% 的外源氮因淋洗而损失了(数据

未列出)。在这种外源氮施用强度下,稻田土壤因外源氮而带来的土壤矿质氮含量变化幅度最大,而碳酸钙添加处理最小,菜地土壤其次。说明当前菜地土壤(以及碳酸钙添加的菜地土壤)环境条件下,单次外源氮的添加对土壤矿质氮留存量不能带来显著增长。

### 3.2 土壤酸化修复效果的验证

虽然 SMP 单缓冲法、SMP 双缓冲法、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  滴定等<sup>[15, 24]</sup>“石灰需求量”确定法具有一定便捷性,但考虑到碳酸钙与生物炭对土壤 pH 值的影响并不能在数分钟间得以体现,而改良剂添加比例又至关重要,故本研究直接以碳酸钙与生物炭作为碱性添加物,以同源稻田土壤为参照标准,培养至稳定状态后,确定添加比例。

为验证改良剂添加比例是否能达到目标效果,在培养试验开展过程中,每次采集的土壤样品均进行了土壤 pH 值的测定(数据未列出),其中 VS + BC 与 VS + CA 处理第 3、35 d 的土壤 pH 数据已与 PS 处理土壤无显著差异,甚至第 3 d VS + CA 处理数值较高于 PS 处理。这说明,本研究所采用的改良剂添加比例确定方法能够在实际应用中达到目标修复效果。

土壤酸化改良剂的作用时长对于维持土壤环境的稳定意义重大,外源氮施用、作物种植以及淋洗都会对修复效果产生影响<sup>[32]</sup>。本研究发现,模拟淋洗使土壤 pH 值在短时间发生了一定程度的降低(图 4)。不添加外源氮条件下,淋洗对稻田土壤以及菜地土壤的 pH 值影响不大;生物炭添加后土壤 pH 值受外源氮影响最小,碳酸钙则相反,显著受到外源氮施用的影响,猜测是由于较高氮淋失带走等比例盐基离子,导致酸化的再次发生。此前研究认为,碳酸钙带来的土壤复酸化现象主要是因为  $\text{HCO}_3^-$  活度的提升加速了有机质分解,提高了作物移走的  $\text{Ca}^{2+}$ ,待碱性消耗后土壤再次发生酸化<sup>[33]</sup>。生物炭添加对于稳定土壤 pH 值的作用,主要通过增加土壤氮留存量并降低氮淋失量来实现。此前相关研究已证实,土壤酸缓冲能力的增加是生物炭调节土壤酸碱度的直接手段<sup>[34]</sup>。

## 4 结论

(1) 利用碱缓冲曲线,根据土壤的酸化程度及其修复标准,能够比较真实地确定出土壤酸化改良剂的适宜用量。

(2) 碳酸钙在无外源氮条件下作为改良剂对土

壤酸化的改良效果较好,添加量小且成本更低。但碳酸钙添加在提高土壤氮矿化速率的同时也增加了土壤氮淋失,不能满足同时提高土壤供氮能力的需求,且碳酸钙在外源氮添加条件下对土壤 pH 的调节效果甚微。因此,对于酸化严重且需要休耕改良的土壤,碳酸钙少量多次的添加可有效缓解酸化并提升土壤矿质氮含量。

(3) 与碳酸钙相比,达到同样的酸化改良效果,生物炭的添加量相对较大且成本较高。但即使在外源氮添加条件下,生物炭仍然可以维持土壤 pH 值稳定并提高土壤持氮能力。由此可见,对仍然进行种植的菜地土壤而言,生物炭是更为适宜的酸化改良剂。

### 参考文献:

- [1] 徐茂,王绪奎,蒋建兴,等. 江苏省苏南地区耕地利用变化特征及其对策[J]. 土壤, 2006, 38(6): 825-829.  
Xu M, Wang X K, Jiang J X, et al. Changes in cultivated land utilization pattern and countermeasures in South Jiangsu [J]. Soils, 2006, 38(6): 825-829.
- [2] 胡安永,刘勤,孙星,等. 太湖地区不同轮作模式下的稻田氮素平衡研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 509-515.  
Hu A Y, Liu Q, Sun X, et al. Nitrogen balance in paddy fields under different rotation systems in the Taihu Lake Region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(5): 509-515.
- [3] Shi W M, Jing Y, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(1): 73-84.
- [4] Min J, Lu K P, Zhao X, et al. Nitrogen removal from the surface runoff of a field scale greenhouse vegetable production system [J]. Environmental Technology, 2015, 36(24): 3136-3147.
- [5] Malhi S S, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48(1-2): 91-101.
- [6] 李俊良,陈新平,李晓林,等. 大白菜氮肥施用的产量效应、品质效应和环境效应 [J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 261-266.  
Li J L, Chen X P, Li X L, et al. Effect of N fertilization on yield, nitrate content and N apparent losses of Chinese cabbage [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 261-266.
- [7] 闵炬,施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 151-157.  
Min J, Shi W M. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu lake region [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 151-157.
- [8] 曹兵,贺发云,徐秋明,等. 露地蔬菜的氮肥效应与氮素去向 [J]. 核农学报, 2008, 22(3): 343-347.  
Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Nitrogen use efficiency and fate

- of N fertilizers applied to open field vegetables[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, **22**(3): 343-347.
- [9] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 79-83.  
Wang Z H, Zong Z Q, Li S X, *et al.* Nitrate Accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields[J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(3): 79-83.
- [10] Min J, Shi W M, Xing G X, *et al.* Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **91**(1): 31-39.
- [11] Lilienfein J, Wilcke W, Vilela L, *et al.* Effect of no-tillage and conventional tillage systems on the chemical composition of soil solid phase and soil solution of Brazilian savanna Oxisols[J]. *Zeitschrift für Pflanzenern? hrung und Bodenkunde*, 2000, **163**(4): 411-419.
- [12] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3414-3421.  
Jia K L T, Yu H, Feng W Q, *et al.* Effect of different N, P and K fertilizers on soil pH and available Cd under waterlogged conditions[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3414-3421.
- [13] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 等. 保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, **10**(1): 57-62.  
Yin R, Zhang H Y, Huang J F, *et al.* Comparison of microbiological properties between soils of rice-wheat rotation and vegetable cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, **10**(1): 57-62.
- [14] 刘付程, 史学正, 于东升. 近 20 年来太湖流域典型地区土壤酸度的时空变异特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(6): 740-744.  
Liu F C, Shi X Z, Yu D S. Spatial and temporal variability of soil acidity in typical areas of Taihu lake region in the last 20 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, **15**(6): 740-744.
- [15] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(9): 206-213.  
Cai D, Xiao W F, Li G H. Advance on study of liming on acid soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(9): 206-213.
- [16] Caires E F, Garbuio F J, Churka S, *et al.* Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, **28**(1): 57-64.
- [17] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1-2): 235-246.
- [18] Peng X, Ye L L, Wang C H, *et al.* Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**(2): 159-166.
- [19] Rodrigues C C, de Moraes Jr D, da Nóbrega S W, *et al.* Ammonia adsorption in a fixed bed of activated carbon [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(4): 886-891.
- [20] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(6): 893-899.
- [21] Sánchez-García M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, *et al.* Biochar increases soil N<sub>2</sub>O emissions produced by nitrification-mediated pathways [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, **2**: 25.
- [22] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, *et al.* Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **213**(1-4): 47-55.
- [23] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, **29**(1): 68-79.  
Wu Y, Xu G, Lü Y C, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**(1): 68-79.
- [24] 张天彬, 涂仕华, 冯文强, 等. 四川酸性土壤石灰需求量方法的比较研究[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 63-65.  
Zhang T B, Tu S H, Feng W Q, *et al.* Comparison of several lime requirement methods on acid soils in Sichuan[J]. *Ecology and Environment*, 2003, **12**(1): 63-65.
- [25] Tarkalson D D, Payero J O, Hergert G W, *et al.* Acidification of soil in a dry land winter wheat-sorghum/corn-fallow rotation in the semiarid U. S. Great Plains[J]. *Plant and Soil*, 2006, **283**(1-2): 367-379.
- [26] 成杰民, 胡光鲁, 潘根兴. 用酸碱滴定曲线拟合参数表征土壤对酸缓冲能力的新方法[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(3): 569-573.  
Cheng J M, Hu G L, Pan G X. New method for evaluating buffering capacity and equilibrium pH of paddy soil with simulation parameter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(3): 569-573.
- [27] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. *土壤*, 2015, **47**(2): 238-244.  
Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control [J]. *Soils*, 2015, **47**(2): 238-244.
- [28] 王文娟, 杨知建, 徐华勤. 我国土壤酸化研究概述[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(8): 54-56.  
Wang W J, Yang Z J, Xu H Q. Overview of soil acidification research in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(8): 54-56.
- [29] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 729-736.  
Xue L H, Li G H, Hou P F, *et al.* Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 729-736.
- [30] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [31] Nicol G W, Leininger S, Schleper C, *et al.* The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 2966-2978.
- [32] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研

- 究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143.
- Yu T Y, Sun X S, Shi C R, *et al.* Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3137-3143.
- [33] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129-136.
- Meng C F, Fu Q L, Shui J G, *et al.* Effect of liming on acidity and exchangeable calcium and magnesium of red soil in central Zhejiang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(2): 129-136.
- [34] 俞映惊, 薛利红, 杨扬, 等. 生物炭对菜地土壤氮平衡及酸碱缓冲能力的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(12): 1947-1955.
- Yu Y L, Xue L H, Yang Y, *et al.* Influence of biochar addition on soil nitrogen balance and buffering capacity for vegetable soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(12): 1947-1955.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:  
 期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.  
 图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.  
 会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.  
 学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.  
 报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.  
 专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: [hjcx@reces.ac.cn](mailto:hjcx@reces.ac.cn); 网址: [www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China .....	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing .....	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels .....	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust .....	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014 .....	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing .....	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System .....	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province .....	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta .....	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus .....	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City .....	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations .....	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River .....	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas .....	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China .....	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment .....	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions .....	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon .....	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb <sup>2+</sup> Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode .....	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode .....	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite .....	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Biochemical Method .....	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge .....	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen .....	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge .....	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria .....	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems .....	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Lou Soil .....	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province .....	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region .....	..... FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles .....	..... FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi .....	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China .....	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation .....	..... JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil .....	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice .....	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH .....	..... ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil .....	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI) .....	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge .....	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar .....	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance .....	..... HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)