

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力

蔡函臻¹, 宁西翠², 王权¹, 张增强¹, 任秀娜¹, 李荣华^{1,3*}, 王美净¹, Mukesh Kumar Awasthi¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 杨凌示范区环境监测站, 杨凌 712100; 3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为了科学评判不同碱性固体物质对调质污泥高温堆肥的影响及其有机肥对贫瘠土壤的改良潜力, 通过用质量分数为 10% 的秸秆(干)炭、硬木炭、粉煤灰和石灰等碱性固体物质对污泥和锯末混合物料进行了调质, 运用好氧堆肥的方式研究了不同碱性固体物质对调质污泥高温堆肥的影响, 并用小青菜盆栽试验法探讨了有机肥对贫瘠土壤的改良潜力。结果表明, 污泥经外源碱性固体调质后, 可以延长高温期的时间, 促进堆肥物料的热灭活无害化; 秸秆炭和硬木炭调质能显著促进有机质矿化, 达 21.65% 和 18.16%; 堆肥过程中各处理堆肥 pH 先降低后升高最终逐渐稳定在 6.78~7.33 之间, 但粉煤灰和石灰调质会使得堆肥初期 pH 较高; 碱性固体调质有利于降低堆肥产品的水溶性盐分含量, 至堆肥结束各处理 EC 均低于 3 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 污泥经过调质后, 堆肥的总氮含量逐渐增加, 但粉煤灰和石灰调质会导致堆肥初期存在一定的氮素损失, 而秸秆炭和硬木炭调质可以减少堆肥初期氮素损失; 各调质处理中 NH_4^+-N 含量先增加后降低, NO_3^--N 均呈现出逐渐增加的趋势, 秸秆炭和硬木炭调质可以促进污泥 NO_3^--N 的转化, 而石灰和粉煤灰调质则对 NO_3^--N 的转化和种子发芽产生一定的抑制作用, 但均不会影响堆肥的腐熟; 贫瘠土壤经过调质堆肥改良后, 土壤有机质和 NPK 含量显著增加, 小青菜生物量增加显著; 与未调质堆肥相比, 虽然调质后的堆肥对小青菜 Cu、Zn 的吸收具有一定的抑制作用, 但相比于原贫瘠土壤而言, 本研究获得的各种堆肥仍能促进小青菜对微量元素 Cu、Zn 的吸收。研究表明, 相比于硬木炭、粉煤灰和石灰等碱性固体物质, 秸秆炭更适用于污泥堆肥调质, 其堆肥产品具有较好的贫瘠土壤改良潜力。

关键词: 污泥; 碱性固体; 调质; 好氧堆肥; 土壤改良

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4848-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201606104

Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration

CAI Han-zhen¹, NING Xi-cui², WANG Quan¹, ZHANG Zeng-qiang¹, REN Xiu-na¹, LI Rong-hua^{1,3*}, WANG Mei-jing¹, Mukesh Kumar Awasthi¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Environmental Monitoring Center of Yangling Agricultural Hi-tech Industry Demonstration Region, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Aiming to evaluate the influence of alkali solids amendment on the sewage sludge aerobic composting and to declare the potential of related composts on infertile soil amelioration, sewage sludge and sawdust mixture were amended with straw biochar, hardwood biochar, fly ash and lime by 10% addition ratio in dry weight during the aerobic composting process; finally, potential of the related composts on the infertile soil amelioration was investigated by pot experiment. The results showed that the alkali solids amendment could prolong the thermophilic phase, and promote the composting material heat inactivation. Addition of straw and hardwood biochar facilitated more than 21.65% and 18.16% organic matter degradation. During the composting, the compost pH decreased at the beginning and then gradually increased before reached values of 6.78-7.33, while the fly ash and lime amendments could lead to higher pH values in the beginning stage. The alkali solids amendment reduced the salinity of the compost with final products EC lower than 3 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The addition of straw and hardwood biochar could increase the total nitrogen content by reducing the ammonia loss at the beginning, while the fly ash and lime amendments would result in ammonia loss in the beginning stage. Despite the composting variation, the contents of nitrate increased and the ammonium salt content decreased gradually. The biochar addition can accelerate the nitrate transformation while the fly ash and lime amendment had slight inhibitory effect on the nitrate transformation and plant germination. The pot experiment revealed that applying compost products could significantly improve the brassica growth, Cu and Zn micronutrients accumulation since the compost addition could increase the soil organic carbon content, as well as soil N, P, and K contents. Compared with the non-amended compost,

收稿日期: 2016-06-16; 修订日期: 2016-07-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2014YB064)

作者简介: 蔡函臻(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废弃物的资源化利用, E-mail: caihanzhen1991@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rh.lee@nwsuaf.edu.cn

the alkali solids amendment could slightly reduce the Cu and Zn micronutrients accumulation, while the fertile potentials were acceptable. The study indicated that straw and hardwood biochar were more suitable than fly ash and lime as compost amendment, and the related compost products had great potential on infertile soil amelioration.

Key words: sewage sludge; alkali solids; amendment; compost; soil amelioration

污泥是在污水处理过程中产生的一种成分极其复杂的有机固体废物,是全球各国排放量较大的固体废物之一,仅 2013 年中国的干污泥产生量就高达 6.26×10^6 t,但污泥的无害化处理率不足 25%,污泥的安全高效处理已经成为当前我国面临的主要环境问题之一^[1]。相比于污泥填埋和焚烧处理技术,堆肥化处理技术因具有能迅速地消纳污泥、能耗低、操作简单和促进污泥肥料化利用的特点,而被认为是最具潜力的污泥处理技术^[2~4]。

已有一些学者采用条垛或反应仓堆肥技术开展了大量的污泥资源化利用研究工作^[5~7],这些传统的堆肥技术仍存在堆制周期长、恶臭气体释放严重、产品品质不稳定的缺点^[8~11]。现代堆肥技术一方面着重从通风量、C/N 比、含水率、温度等工艺参数进行调节^[11~13]。另一方面着重探讨引入外源添加剂对堆肥微环境进行调控。例如,添加镁盐^[14]、磷酸盐^[15]等减少堆肥过程氨气的挥发;添加沸石^[16,17]、白蚁丘^[18]、鸟粪石^[19]等可以在减少氮素挥发损失的同时,促进有机物矿化和堆肥腐熟。相比而言,一些碱性固体材料,如石灰^[20]、粉煤灰^[20]、膨润土^[21]、生物炭^[22]等,则在促进堆肥病原微生物的热灭活、加速有机物料矿化和降低重金属等污染物的生物有效性方面更具优势^[4,16,17,20]。

虽然碱性矿物材料在促进有机固体废物的资源化、安全化和减量化等方面的作用已被诸多研究所证明,但目前已有研究关注堆肥过程中单一碱性矿物材料的作用考察较多,较少涉及产品的后续土地利用潜力研究,且存在诸多结论不一致之处。例如, Awasthi 等^[4]在研究中指出,10% 沸石调质能使污泥堆肥 pH 稳定在 5.27 ~ 7.26 之间,但氮素损失较严重且 EC 在堆肥过程中持续升高; Chan 等^[16]则发现添加 10% 沸石的堆肥没有明显的氮素损失,但 pH 则始终较高(9.0 左右); Villaseñor 等^[17]则认为添加沸石污泥堆肥能显著促进有机碳减少和氮素持留,但 pH 则由最初的 8.2 会降低并稳定在 7.1 左右。导致产生不一致结论的原因是由于堆肥是一个复杂的生物化学过程,堆肥过程的变化受堆肥原料、添加剂种类、过程控制等诸多因素影响,在评定不同添加剂在堆肥中的应用潜力时必须在同一体系下进行科学比较^[22~24],并结合相关堆肥产品的土地利

用,才能得出较为客观的评价^[25,26]。本试验选用秸秆炭、硬木炭、粉煤灰、石灰作为不同的碱性添加剂,以 10% 的添加量进行调质堆肥,研究不同碱性固体对污泥的调质堆肥影响,以便与前人的研究进行比较。

土壤是保障粮食生产的第一道防线,是筑牢健康人居环境的首要基础,也是堆肥产品最终的受纳者,其质量状况直接关系到经济发展和百姓民生福祉。但我国的土壤贫瘠化严重,坚守 18 亿亩耕地红线,保障粮食安全战略,实施耕地增量提质的关键便是减少化肥投入增加有机肥施用^[28]。为此,本研究通过在比较石灰、粉煤灰、生物炭等不同碱性固体材料调质污泥高温堆肥过程的差异基础上,并结合小青菜盆栽试验探讨了堆肥产品在改良贫瘠土壤中的应用潜力,旨在科学评定碱性固体材料添加剂对堆肥过程的影响和相关产品在改良土壤方面的潜力,促进污泥的资源化利用和土壤改良。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验污泥采自杨凌污水处理厂污泥脱水车间,锯末采自杨凌半个城村鼓乐厂,石灰购自当地某建材市场,粉煤灰购自当地某火电厂,硬木炭和秸秆炭分别为当地某生物有限公司提供的 450 ~ 550℃ 干馏苹果树枝条炭和小麦秸秆炭。试验材料的理化性质如表 1 所示。

1.2 堆肥制作

试验中考察了 5 个不同处理。将污泥:锯末以干质量比 10:1 的比例进混合,然后根据文献^[4,16,27,30]推荐的添加比例,在污泥和锯末混合物中添加质量分数分别为 10% 的秸秆炭、10% 的硬木炭、10% 的粉煤灰和 10% 的石灰,以不添加碱性材料为对照。将物料用手充分混匀,装入自行设计的长方体自动搅拌式强制通风好氧堆肥反应器^[21,22]堆制 52 d。堆肥开始时,通风量约 $0.35 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$;堆体温度升高到 40℃ 以后,通风量调节为约 $0.50 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 。各处理的初始 C/N 比均大于 20,整个堆肥过程始终调节含水率约 60% 左右,每一处理重复 2 次。堆肥结束后,将堆肥鲜样风干以备盆栽试验。各堆肥处理初始理化性质见表 2。

表 1 堆肥材料基本性质¹⁾

Table 1 Basic properties of compostable materials

项目	秸秆炭	硬木炭	粉煤灰	石灰	木屑	污泥
Zn/mg·kg ⁻¹	18.63 ± 0.09	19.65 ± 0.11	28.79 ± 1.01	ND	42.75 ± 0.24	756.01 ± 8.34
Cu/mg·kg ⁻¹	12.17 ± 0.10	20.79 ± 0.17	12.27 ± 0.53	ND	7.59 ± 0.32	266.10 ± 13.02
Pb/mg·kg ⁻¹	0.06 ± 0.02	—	37.34 ± 0.13	ND	—	27.12 ± 1.15
Cd/mg·kg ⁻¹	—	—	<0.001	ND	—	0.37 ± 0.04
C/g·kg ⁻¹	644.10 ± 2.05	674.72 ± 2.14	ND	ND	546.27 ± 1.46	439.21 ± 3.30
N/g·kg ⁻¹	7.13 ± 0.06	2.62 ± 0.30	ND	ND	1.72 ± 0.07	20.39 ± 0.60
pH	8.86 ± 0.13	9.76 ± 0.22	11.67 ± 0.07	12.38 ± 0.04	6.75 ± 0.01	7.08 ± 0.03
EC/mS·cm ⁻¹	0.54 ± 0.01	0.48 ± 0.01	1.25 ± 0.02	1.59 ± 0.13	0.13 ± 0.01	0.20 ± 0.04
H ₂ O/%	0.10 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.52 ± 0.01	0.17 ± 0.04	13.38 ± 0.06	55.38 ± 0.31
BET/m ² ·g ⁻¹	235.23	36.31	ND	ND	ND	ND
TK/g·kg ⁻¹	11.54 ± 0.07	6.73 ± 0.05	0.57 ± 0.01	ND	2.09 ± 0.30	5.28 ± 0.13
TP/g·kg ⁻¹	2.07 ± 0.06	1.38 ± 0.04	0.05 ± 0.01	ND	0.16 ± 0.04	2.60 ± 0.15

1) —表示未检测出,ND 表示未检测

表 2 不同堆体初始理化性质

Table 2 Initial physical and chemical properties of different compost

处理	pH	EC /μS·cm ⁻¹	总有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	C/N	氨氮 /mg·kg ⁻¹	硝氮 /mg·kg ⁻¹
对照	7.20	531.50	448.94	18.68	24.03	10.22	45.90
10% 秸秆炭	6.93	579.30	468.44	17.46	26.83	24.02	18.05
10% 硬木炭	6.85	641.50	471.52	17.02	27.70	22.35	23.47
10% 粉煤灰	7.57	1030.50	406.46	16.77	24.24	16.74	9.58
10% 石灰	7.83	1791.50	405.43	16.74	24.23	18.14	9.58

1.3 盆栽试验

采集自杨凌某地的废弃窑厂区的表层 0 ~ 30 cm 黄褐土,该区域土壤贫瘠,几乎寸草不生. 土壤样品理化性质分析表明,pH 8.67,黏粒 45.22%,EC 186.33 μS·cm⁻¹,全钾 4.25 g·kg⁻¹,全氮 0.26 g·kg⁻¹,全磷量 0.58 g·kg⁻¹,有机质 4.76 g·kg⁻¹,土壤重金属(Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 等)含量均低于 GB 15618-1995 土壤质量标准一级标准值. 试验前,将土壤样品挑去碎石块后实验室风干,木棒压碎并过 2 mm 尼龙筛. 参考文献[22]的方法,称取土壤样品 3 kg,并混入 210 g 不同风干堆肥样品,充分混匀后装 2.5 kg 混合物于塑料花盆中,以不添加堆肥样品为对照(不添加任何肥料),加入去离子水保持含水率约 80% 田间持水量,室温静置 1 个月. 然后每盆播入 10 粒小青菜种子,等种子萌发至 4 个叶片后间苗至每盆 5 株,每一处理重复 3 盆,在网室中持续盆栽试验 35 d 后收获小青菜地上部分.

1.4 测定方法

于每天 09:00、15:00 和 21:00 左右,启动搅拌机进行物料翻堆,并测量记录当时的堆体温度及气温,取平均值. 于第 1、7、13、19、25、31、37、45 和 52 d 分别采集样品 2 份,一份鲜样 700 g 用于含

水率、pH 值、电导率 EC、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的测定,另一份鲜样 300 g 在 40℃ 低温干燥后,于陶瓷研钵中研磨并过 0.15 mm 孔径尼龙筛,用于测定总氮和有机碳. 种子萌发指数 GI 测定用雪里蕻种子萌发法^[21],含水率测定采用鲜样 105℃ 烘干失重法^[21],pH 值和电导率 EC 测定采用电极法(水土质量比 5:1)^[21];有机碳测定采用重铬酸钾氧化硫酸亚铁滴定法,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的测定分别采用靛酚蓝比色法和酚二磺酸比色法^[22],全氮测定采用 H₂SO₄-HClO₄ 消解,半微量凯氏定氮法^[22]. 所有指标的测定均为 3 次.

盆栽试验的小青菜在收获前先用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片的叶绿素,然后将收获的小青菜装入信封后 105℃ 杀青 30 min,60℃ 烘干至恒重,记录干质量;然后将青菜干物质用 HNO₃-HClO₄ 消解后通过 Agilent 7500 型 ICP-MS 仪测定 Cu 和 Zn 含量;同时采集盆栽土壤样品,电极法测定 pH 值和电导率 EC(水土质量比 2.5:1),土壤样品风干后经 H₂SO₄-HClO₄ 消解,分别以半微量凯氏定氮法、磷钼蓝比色法和火焰光度法测定氮磷钾含量^[29],以重铬酸钾氧化硫酸亚铁滴定法测定有机碳. 用标准物质(GSB 04-1721-2004,GBW 08502)进行质量控制,

数据显著性检验用 SPSS 18.0 软件在置信度 $P < 0.05$ 下以单边 ANOVA 法进行。

2 结果与讨论

2.1 调质对堆肥温度、有机碳、pH 和 EC 的影响

随着堆肥时间的延长,各处理的堆体均能快速升温,并维持 50℃ 超过 1 周,达到了无害化的要求,但各处理温度变化在前 25 d 存在一定差异[图 1(a)]。例如,碱性物质调质的堆体均能在 3 d 之内快速升温至 50℃ 以上,而对照处理则需要 5 d;在堆肥过程中,对照、秸秆炭、硬木炭、粉煤灰和石灰处理中温度处于高温期(50℃ 以上)的时间分别持续了 8、17、15、12 和 10 d,各处理的最高温度分别为 58℃(第 6 d)、61.7℃(第 9 d)、61.3℃(第 11 d)、59.3℃(第 9 d)和 59.7℃(第 9 d)。用碱性固体物质调质污泥可以延长高温期的时间,这一研究结果与前人进行 MgO-沸石调质厨余堆肥^[16]、膨润土^[21]和生物炭^[22]猪粪堆肥的研究结果类似,说明在污泥经过外源碱性固体调质后,可以促进堆肥物料的热灭活无害化。

与此同时,随着堆肥时间的延长,各处理中有机碳逐渐降低并逐渐趋于稳定[图 1(b)],这与堆肥本身的有机质的好氧生物矿化和稳定化过程特点相吻合。在添加秸秆炭和硬木炭的处理中,最初的有机碳含量高于添加粉煤灰和石灰处理,这是由于粉煤灰和石灰本身所含有有机质极少,而秸秆炭和硬木炭所含有有机碳较多所致。至堆肥结束时,对照、秸秆炭、硬木炭、粉煤灰和石灰处理中的有机碳分别减少了 14.42%、21.65%、18.16%、11.04% 和 11.91%。由此可见,不同调质原料具有不同的效果,在堆肥过程中添加秸秆炭、硬木炭能有效促进有机质的降解,可能是由于生物炭的引入增加了堆肥物料的孔隙和氧气供给,加速了有机质的好氧分解^[20~22],这与 Dias 等^[30]和 Steiner 等^[31]在禽粪中添加生物炭的研究结论类似;相比于对照,添加粉煤灰和石灰对有机质降解没有明显的促进作用。本研究中碱性固体调质后的污泥堆肥有机碳减少量在 11.04%~21.56% 之间,低于 Chan 等^[16]的 10% 沸石调质厨余堆肥有机碳减少量(29.4%~35.3%),这可能是由于相比本研究中的 4 种添加剂,沸石具有较高的孔隙的缘故,也有可能是堆肥原料的不同所致。

整个堆肥过程中,各处理 pH 值均在最初几天有一定的升高,此后随着堆肥时间的延长各处理 pH

值呈现出先降低后逐渐趋于稳定的趋势,除粉煤灰处理以外其余处理 pH 值基本稳定在 6.78~7.33 之间[图 1(c)]。堆肥初期 pH 值的升高,可能与堆肥初期氨气的挥发有关,也可能与外源碱性物质的添加有关。例如第 7 d 时,对照、秸秆炭、硬木炭、粉煤灰和石灰处理的 pH 值分别为 9.01、7.62、8.39、9.09 和 9.21。这一结果和前人^[20]在污泥堆肥中添加碱性粉煤灰和石灰的研究结果相类似,即碱性较强的物质引入会导致堆肥的 pH 较高。随着堆肥时间的延长,氨化作用逐渐减弱、物料分解产生有机酸和 CO₂ 的增加导致体系 pH 值逐渐降低,随着堆肥的持续进行,有机物持续微生物分解,形成的碳酸氢盐缓冲体系使得堆肥后期 pH 值逐渐升高^[22]。

堆肥过程中 EC 的变化如图 1(d)所示。从中可见,除对照和添加硬木炭处理的 EC 在整个堆肥过程持续升高以外,其余各处理中 EC 均呈现出先逐渐增加后稍有降低的趋势。整个堆肥过程中添加粉煤灰和石灰处理的 EC 相对较高,可能是由于粉煤灰和石灰本身碱性较强所致。这一研究和前人的研究有一定的可比性。例如,Chan 等^[16]在研究中发现,MgO-K₂HPO₄ 调质厨余堆肥的 EC 会逐渐增加至 7 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,而 10% MgO-沸石调质的厨余堆肥的 EC 也在逐渐增高但仍低于 4 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。堆肥过程 EC 的增加暗示着有机物料的矿化降解产生了无机盐分,EC 的降低可能是由于无机盐形成难溶物质所致^[17,22]。本研究中各处理堆肥 EC 均低于 3 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,说明碱性固体调质有利于降低堆肥产品的水溶性盐分含量,有利于避免有机肥的土壤盐渍化风险^[21]。

2.2 调质对堆肥总氮、铵态氮、硝态氮和生物毒性的影响

堆肥过程控制含水率在 60%~70% 之间最适合于微生物活动,因此本试验在整个试验中控制了堆肥物料含水率在 60% 左右,并未对堆肥物料的碳氮比进行调节,只是从工艺参数的角度控制堆肥体系的一致性,从而便于系统比较不同外源碱性固体调质对污泥堆肥的影响。在堆肥过程中,氮素是影响微生物生长及活性的限制因素,也是衡量堆肥利用价值的重要指标。

本试验堆肥过程中总氮的变化如图 2(a)所示。从中可见,除了添加秸秆炭和硬木炭处理外,其余各处理的总氮变化趋势基本一致,即在堆肥前 7 d 稍有减小,随后逐渐增加并保持相对稳定。这一结果

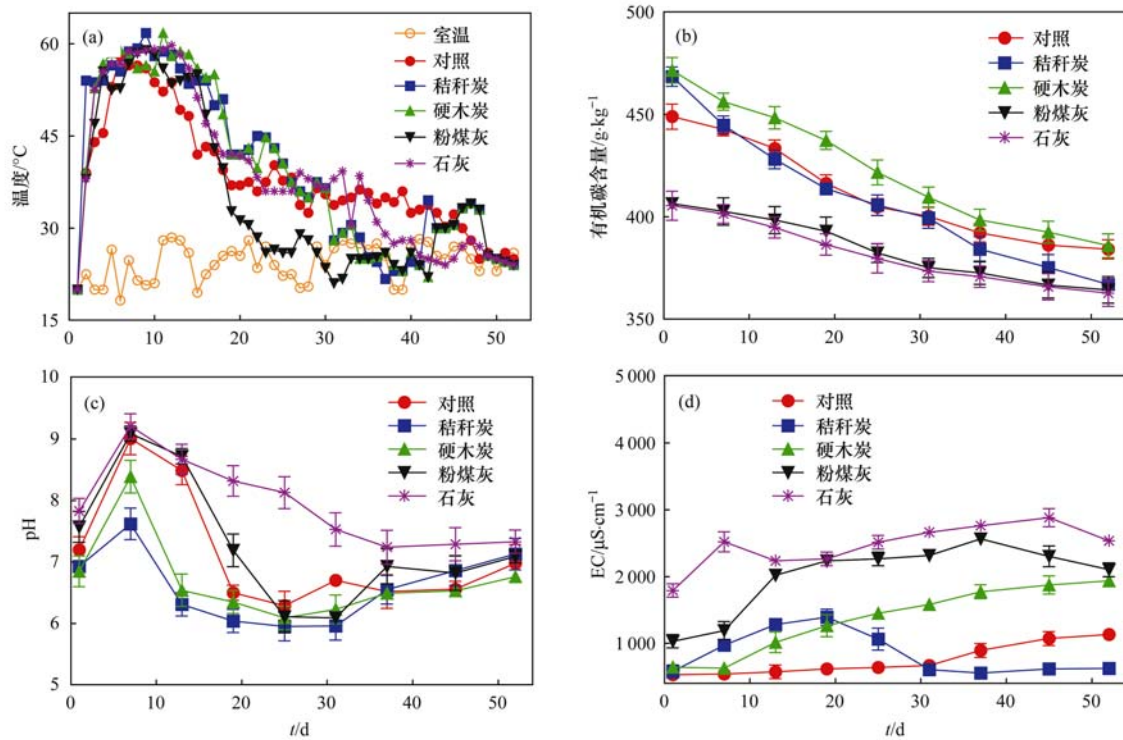


图 1 堆肥过程温度、有机碳、pH 和 EC 的变化

Fig. 1 Changes in temperature, organic carbon, pH and EC during co-composting process

表明堆肥氮素损失主要在堆肥前 7 d,这和堆肥过程中的实际观察相一致,且添加秸秆炭和硬木炭有利于减少氮素损失,随着堆肥的持续进行和有机物的逐渐降解,堆肥养分的“浓缩效应”使总氮含量逐渐增加. 这一研究结果和 Li 等^[22]向猪粪堆肥中添加生物炭的研究结果相类似. 在堆肥初期,对照和添加粉煤灰和石灰处理中总氮的减少与其本身在堆肥初期的碱性较强有关,例如在猪粪和污泥堆肥中添加 2.5%~35% 的粉煤灰和石灰等会导致碱性条件下氨气挥发严重^[20];而本研究中加秸秆炭和硬木炭调质处理中没有明显的氮素损失,可能是由于富含孔隙结构的炭质材料对氨气的吸附能力较强所致^[22]. 综合以上,堆肥中进行碱性固体秸秆炭和硬木炭调质能有效减少氮素损失.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化如图 2(b)和 2(c)所示. 从中可见,各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化趋势相似,即先增加后降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初期含量的增加与 NH_3 挥发有关,后期随着堆肥的持续进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 逐渐转变为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,因而含量降低. 这和前人的研究结果一致. 例如, Fang 等^[32]发现粉煤灰用量达 35% 时会加速 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的损失,而在本研究中并未明显观察到该现象,可能是由于本试验中最高粉煤灰添加比例仅为 10%. 本研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 高峰期的含量以秸秆炭、硬

木炭、对照、石灰和粉煤灰处理的顺序递减,这也说明了相比于对照而言,添加秸秆炭和硬木炭能吸收 NH_3 形成 NH_4^+ ,而添加石灰和粉煤灰则会导致严重的 NH_3 挥发. 本试验各处理中 52 d 后堆体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均不足 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明所有堆肥已达到腐熟堆肥的标准^[22]. 从图 2(c)可见,各处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均呈现出增加的趋势. 堆肥结束时,各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别达到 120.2、765.3、723.4、83.0 和 50.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这表明,相比于对照处理,用秸秆炭和硬木炭调质可以促进污泥有机物料的好氧矿化,而石灰和粉煤灰调质则对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化有一定的抑制,其可能的原因是由于秸秆炭和硬木炭本身碱性较弱且含有丰富孔隙对硝化过程有促进作用^[22],而粉煤灰和石灰本身碱性较强的特质抑制了硝化细菌的生长所致^[20,29]. 比较本研究中所考察的 4 种添加剂在污泥堆肥过程中氮素转化方面的差异,可知同为碱性固体材料的秸秆炭、硬木炭属于生物质炭,而粉煤灰和石灰属于矿物材料,这些物质通常都具有一定的碱性特征. 但生物炭来源于植物残体的碳化过程,因制备条件的差异,常导致生物炭中仍残留有一定的酸性含氧有机官能团^[22,26,30],因而碱性稍弱于石灰和粉煤灰;另外,生物炭本身因具有丰富的孔隙结构,而具有良好的氨气吸附能力,同时这些

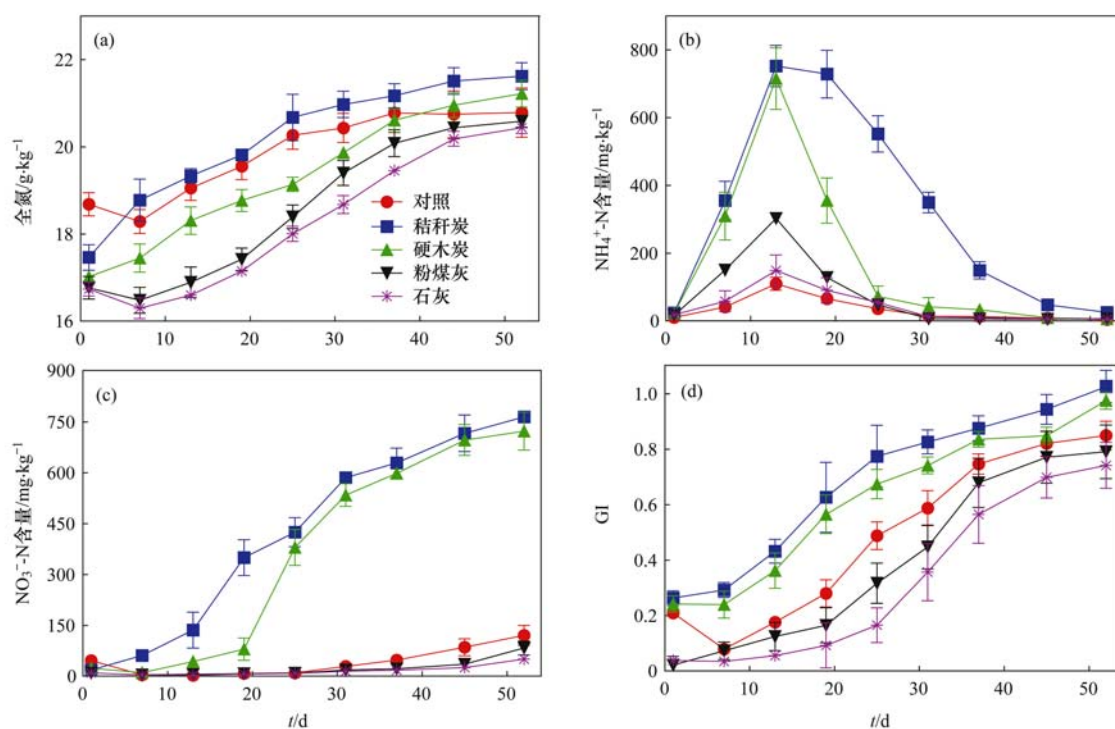


图2 堆肥过程全氮、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和GI的变化

Fig. 2 Changes in total nitrogen, NH_4^+ -N, NO_3^- -N and GI during co-composting process

多孔结构也有利于微生物生长繁殖,能改善堆肥条件及提高堆肥产品的质量^[22,26,30]. 相比于生物炭而言,石灰和粉煤灰等矿物材料本身组分复杂且具有极强的碱性,进而具有较强的氨挥发促进能力^[24,29].

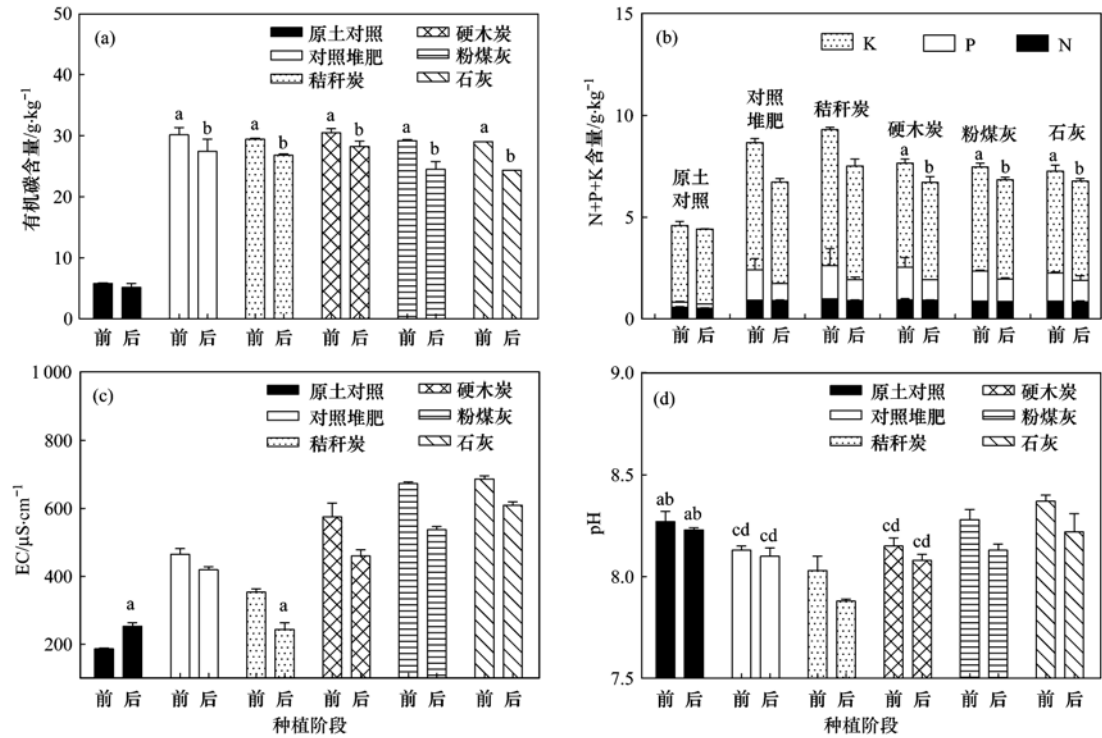
通过考察堆肥的种子发芽指数,不但可以检测堆肥样品中的残留植物毒性,而且也能预测堆肥的腐熟程度. Zucconi 等^[33]认为,当GI大于0.5,说明堆肥已腐熟并达到了可接受的程度,即基本没有毒性. 本试验中GI的变化如图2(d)所示. 从中可知,随着堆肥时间的延长,所有处理中,雪里蕻种子的发芽指数GI逐渐增加并最终均超过0.5,说明所有堆肥已达到腐熟堆肥的标准. 比较对照处理和其他调质处理的发芽指数GI可以发现,对照处理在堆肥初期GI有一定的减小,而其余处理则没有明显的减少现象. 堆肥初期GI的减小可能是由于对照处理在堆肥初期物料所含的挥发性脂肪酸及水溶性小分子有机酸等对植物生长产生了抑制作用^[21,22],而经过碱性固体调质后能促进挥发性脂肪酸及水溶性小分子有机酸的矿化所致. 本研究中尤其是粉煤灰和石灰调质污泥堆肥的GI始终弱于其他处理,说明虽然强碱性物质调质会对种子发芽产生一定的抑制作用^[22],但不会影响堆肥的腐熟.

2.3 调质堆肥对贫瘠土壤理化性质的影响

调质堆肥对贫瘠土壤理化性质的影响见图3. 土壤经过秸秆炭和硬木炭调质堆肥改良后土壤有机质和NPK含量显著增加[图3(a)和图3(b)],随着种植过程的进行土壤有机质的逐渐矿化土壤pH逐渐降低;同时随着NPK等养分被植物吸收,土壤EC相比于种植前稍有降低^[22],但不同调质堆肥改良后土壤EC均显著升高[图3(c)]. 土壤经过粉煤灰和石灰调质堆肥改良后pH稍有升高,约8.28~8.37;原土在耕作前后pH变化不大,稳定在8.23~8.25之间;秸秆炭调质堆肥改良后土壤pH显著低于原土,为8.15,但调质堆肥改良土壤在种植小青菜后土壤pH均稍有降低,并以秸秆炭调质堆肥改良后土壤pH降低最显著. 这可能是由于不同调质堆肥本身pH差异较大,因而引起土壤pH稍有波动^[21],但总体而言,本研究中几种调质污泥堆肥可以显著增加土壤有机质和NPK的含量,能有效的改良贫瘠土壤.

2.4 调质堆肥对小青菜生长的影响

经过35d生长,各处理小青菜地上部分干生物量如图4(a)所示. 添加调质堆肥的小青菜干生物量明显高于原土,其中秸秆炭和硬木炭处理相对高于对照、粉煤灰和石灰处理,分别为2.53 g·盆⁻¹和



图中同一字母表示在 $P < 0.05$ 下不存在显著差异

图3 盆栽试验前后土壤有机碳、NPK 含量、pH 和 EC 的变化

Fig. 3 Changes in soil pH, EC, organic carbon and NPK content before and after pot experiment

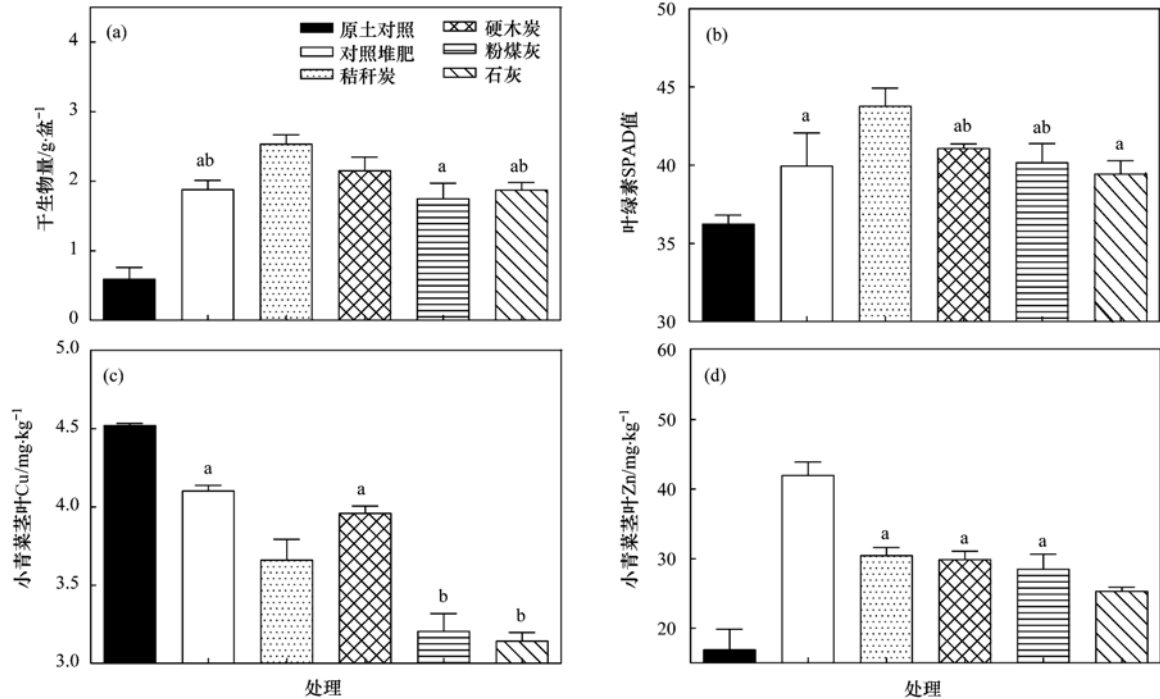


图4 盆栽试验中小青菜的生物量、叶绿素 SPAD、Cu 和 Zn 含量

Fig. 4 Biomass, chlorophyll, Cu and Zn content of the brassica in the pot experiment

2.15 $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$. 由此证明施用调质堆肥对小青菜的生长有促进作用,这种促进作用主要是由于污泥中含有大量的 NPK、有机质等,有利于植物对营养物质

的吸收. 叶绿素是判断植物光合作用和同化能力强弱的重要生理指标,叶绿素含量低,可能会减弱植物的光效率和以及对养分的吸收,降低植物的生长活

力^[34]。本试验中,不同处理叶绿素含量差异较大,由图 4(b)可以看出添加调质堆肥的小青菜叶片叶绿素含量明显高于原土,且差异显著。其中添加秸秆炭堆肥的小青菜叶绿素含量最高,SPAD 值相比原土提高了 20.8%。综合以上可得出结论,添加调质堆肥能有效促进植物生长,提高光合作用,使小青菜增产。

不同调质堆肥对小青菜地上部分 Cu、Zn 积累即以干生物量计的小青菜地上部分 Cu、Zn 含量如图 4(c)和 4(d)所示。从中可见,原贫瘠土壤种植的小青菜地上部分 Cu 含量明显高于其他处理,达 $4.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而 Zn 含量则相反,明显低于添加堆肥的处理。添加调质堆肥的小青菜 Cu、Zn 含量均比添加对照堆肥处理的小青菜低,说明调质后的堆肥对小青菜 Cu、Zn 的吸收具有一定的抑制作用,但相比于原贫瘠土壤而言,本试验的各种堆肥产品仍能促进小青菜对 Cu、Zn 的吸收。这和 Wang 等^[21]向猪粪中添加膨润土的研究结果类似,即堆肥添加碱性矿物会降低重金属离子的生物有效性。

3 结论

(1)污泥经过外源碱性固体调质后,可以延长高温期的时间,促进堆肥物料的热灭活无害化,促进有机质的矿化;整个堆肥过程中,各处理堆肥 pH 值先降低后升高并逐渐趋于稳定;碱性固体调质有利于降低堆肥产品的水溶性盐分含量,避免有机肥的土壤盐渍化风险。

(2)污泥经过外源碱性固体调质后,堆肥的总氮含量逐渐增加,但粉煤灰和石灰调质会导致堆肥初期存在一定的氮素损失,而秸秆炭和硬木炭调质可以减少堆肥初期氮素损失。各调质处理中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量先增加后降低, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均呈现出逐渐增加的趋势,秸秆炭和硬木炭调质可以促进污泥 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化,而石灰和粉煤灰调质则对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化和种子发芽产生一定的抑制作用,但均不会影响堆肥的腐熟。

(3)贫瘠土壤经过调质堆肥改良后,土壤有机质和 NPK 含量显著增加,小青菜生物量增加显著;与未调质堆肥相比,堆肥调质后对小青菜 Cu、Zn 的吸收具有一定的抑制作用,但 4 种调质堆肥对促进小青菜对微量元素 Cu、Zn 的吸收方面仍高于原贫瘠土壤。

(4)从调质堆肥的养分转化、小青菜生长和土壤理化性质的改善角度而言,相比于硬木炭、粉煤

灰和石灰,秸秆炭在堆肥调质上具有较好的应用潜力。

参考文献:

- [1] Yang G, Zhang G M, Wang H C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. *Water Research*, 2015, **78**: 60-73.
- [2] Wang K, He C, You S J, *et al.* Transformation of organic matters in animal wastes during composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 745-753.
- [3] Ahmad T, Ahmad K, Alam M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **124**: 1-13.
- [4] Awasthi M K, Pandey A K, Bundela P S, *et al.* Co-composting of gelatin industry sludge combined with organic fraction of municipal solid waste and poultry waste employing zeolite mixed with enriched nitrifying bacterial consortium [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **213**: 181-189.
- [5] Echeverria M C, Cardelli A, Bedini S, *et al.* Microbially-enhanced composting of wet olive husks [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **104**: 509-517.
- [6] Awasthi M K, Pandey A K, Khan J, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **168**: 214-221.
- [7] Awasthi M K, Pandey A K, Bundela P S, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **182**: 200-207.
- [8] Sánchez-Monedero M A, Roig A, Paredes C, *et al.* Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **78**(3): 301-308.
- [9] Doublet J, Francou C, Poitrenaud M, *et al.* Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 1298-1307.
- [10] Zhou Z H, He S L, Huang T L, *et al.* Degradation behaviour and biological properties of gelatin/hyaluronic acid composite scaffolds [J]. *Materials Research Innovations*, 2013, **17**(6): 420-424.
- [11] Xie K Z, Jia X S, Xu P Z, *et al.* The addition of modified attapulgite reduces the emission of nitrous oxide and ammonia from aerobically composted chicken manure [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(10): 1174-1181.
- [12] 韦蓓, 黄福义, 苏建强. 堆肥对污泥中四环素类抗生素及抗性基因的影响 [J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5431-5438.
Wei B, Huang F Y, Su J Q. Effect of composting on tetracyclines and tetracycline resistance genes in sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(12): 5431-5438.
- [13] 赵晨阳, 魏源送, 葛振, 等. 连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2798-2806.

- Zhao C Y, Wei Y S, Ge Z, *et al.* Emissions of greenhouse gas and ammonia from sewage sludge composting by continuous aerated turning pile[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2798-2806.
- [14] Jeong Y K, Kim J S. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **79**(2): 129-133.
- [15] Lu D A, Wang L X, Yan B X, *et al.* Speciation of Cu and Zn during composting of pig manure amended with rock phosphate [J]. *Waste Management*, 2014, **34**(8): 1529-1536.
- [16] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 838-844.
- [17] Villaseñor J, Rodríguez L, Fernández F J. Composting domestic sewage sludge with natural zeolites in a rotary drum reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 1447-1454.
- [18] Karak T, Sonar I, Paul R K, *et al.* Composting of cow dung and crop residues using termite mounds as bulking agent [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **169**: 731-741.
- [19] Ren LM, Schuchardt F, Shen Y J, *et al.* Impact of struvite crystallization on nitrogen losses during composting of pig manure and cornstalk[J]. *Waste Management*, 2010, **30**(5): 885-892.
- [20] Wong J W C, Fung S O, Selvam A. Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(13): 3324-3331.
- [21] Wang Q, Li R H, Cai H Z, *et al.* Improving pig manure composting efficiency employing Ca-bentonite [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **87**: 157-161.
- [22] Li R H, Wang Q, Zhang Z Q, *et al.* Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**(7): 815-826.
- [23] 居玉坤, 赵卫兵, 王鹤立, 等. 不同添加剂下污泥堆肥化处理氮素变化研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(11): 4897-4901.
- Ju Y K, Zhao W B, Wang H L, *et al.* Research of nitrogen change in compost under condition of different additives [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(11): 4897-4901.
- [24] 冯瑞, 银奕, 李子富, 等. 添加低比例石灰调质的脱水污泥堆肥试验研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(5): 1442-1448.
- Feng R, Yin Y, Li Z F, *et al.* Experimental study on composting of dewatered sewage sludge by addition of low ratio lime mixture [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(5): 1442-1448.
- [25] Zhao X L, Li B Q, Ni J P, *et al.* Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**(1): 232-240.
- [26] Fang W, Wei Y H, Liu J G. Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: Heavy metal leaching characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **310**: 1-10.
- [27] 李荣华, 张广杰, 张增强, 等. 添加木炭改善猪粪稻壳好氧堆肥工艺及质量[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(16): 230-238.
- Li R H, Zhang G J, Zhang Z Q, *et al.* Improving pig manure and rice husk compost technology and quality by wood charcoal addition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(16): 230-238.
- [28] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 的耕地土壤养分贫瘠化评价及其障碍因子分析[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(8): 1375-1384.
- Yang Q Y, Yang J S, Yao R J, *et al.* GIS-based evaluation of soil nutrient depletion and analysis of its Limiting factors in Yucheng city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(8): 1375-1384.
- [29] 李荣华, 张广杰, 秦睿, 等. 粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中养分转化研究[J]. *农业机械学报*, 2012, **43**(4): 100-105, 142.
- Li R H, Zhang G J, Qin R, *et al.* Nutrient transformation during swine manure co-composting with flyash under aerobic conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, **43**(4): 100-105, 142.
- [30] Dias B O, Silva C A, Higashikawa F S, *et al.* Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(4): 1239-1246.
- [31] Steiner C, Das K C, Melear N, *et al.* Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1236-1242.
- [32] Fang M, Wong J W C, Ma K K, *et al.* Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: Nutrient transformations[J]. *Bioresource Technology*, 1999, **67**(1): 19-24.
- [33] Zucconi F, Pera A, Forte M, *et al.* Evaluating toxicity of immature compost[J]. *BioCycle*, 1981, **22**(2): 54-57.
- [34] 李艳宾, 万传星, 张琴, 等. 棉秆腐解液对棉花种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(6): 1258-1262.
- Li Y B, Wan C X, Zhang Q, *et al.* Effect of decomposed liquids of cotton stalk on cotton seeds Germination and seedling growth [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2009, **28**(6): 1258-1262.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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