

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价

徐强¹, 胡克林^{1*}, 李季¹, 韩卉¹, 杨合法²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 农业部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业大学曲周实验站, 曲周 057250)

摘要: 全面系统地评价不同生产模式下设施蔬菜生产过程的环境效应, 可为降低蔬菜生产过程中的负面环境影响提供理论指导。本文以华北平原河北省曲周县4 a春茬设施茄子的生产过程及其对环境的影响。结果表明, 3种模式的水体毒性、富营养化和土壤毒性危害潜势对环境影响的贡献较大, 分别占82.05%~84.02%、10.29%~12.32%和2.62%~3.48%, 且主要发生在农作子系统中, 均主要是由氮磷流失、农药残留及有机肥所携带的重金属所致。综合模式的环境影响综合指数最低, 为0.596, 分别比常规和有机模式降低了30.3%和6.7%, 该模式显著降低了设施蔬菜农作子系统的污染物排放, 为最佳生产模式。因此, 优化田间管理措施(如施用生物农药、优质有机肥和提高氮磷利用效率)可较好地控制蔬菜生产生命周期负面环境影响及提高该地区设施蔬菜生产的环境可持续能力。

关键词: 设施蔬菜; 环境影响; 生命周期评价; 可持续性; 华北平原

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2480-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201710007

Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain

XU Qiang¹, HU Ke-lin^{1*}, LI Ji¹, HAN Hui¹, YANG He-fa²

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Quzhou Experimental Station, China Agricultural University, Quzhou 057250, China)

Abstract: Organic agriculture has a higher potential than traditional agriculture to reduce environmental emissions. However, heavy metals in organic manure inevitably exacerbate eco-toxicity. At present, there are few studies on systematically and comprehensively evaluating the effects of different production modes on the environmental impact of vegetable production in the North China Plain (NCP). The objective of this study is to provide a theoretical direction for reducing the negative impact of greenhouse vegetable production. In this study, we used a greenhouse eggplant production (2013-2016) as case study and conducted a field experiment in Quzhou County, Hebei Province, China. The life cycle assessment (LCA) approach was used to analyze and compare the production and environmental impacts of eggplant production under three modes: conventional, integrated, and organic. The results showed that the potential for water contamination, eutrophication, and soil contamination was high among the three modes, ranging from 82.05% to 84.02%, 10.29% to 12.32%, and 2.62% to 3.48%, respectively. This is occurred mainly in the arable farming subsystem and is attributed to the loss of nitrogen (N) and phosphorus (P), pesticide residues, and heavy metals in organic manure. The environmental impact index of the integrated mode is the lowest, with a value of 0.596, which is 30.3% and 6.7% lower than those of the conventional and organic modes. The integrated mode significantly reduces the emission of pollutants from the greenhouse vegetable production in the arable farming subsystem; therefore, it is the best management practice. In the integrated mode, the environmental costs of producing one ton of eggplant are 46.6 J for energy depletion, 81.9 m² for land occupation, 0.004 6 m³ for water depletion, 0.005 4 kg (CO₂-eq) for global warming, 0.006 0 kg (SO₂-eq) for acidification, 0.073 5 kg (PO₄-eq) for aquatic eutrophication, 2.84E-05 kg (1,4-DCB-eq) for human toxicity, 0.489 2 kg (1,4-DCB-eq) for aquatic eco-toxicity, and 0.017 4 kg (1,4-DCB-eq) for soil eco-toxicity. Optimizing field management measures such as the application of biological pesticides, using high quality organic fertilizer, and improving the efficiency of N and P use, can better control the negative environmental impacts in the life cycle of vegetable production and improve environmental sustainability in the NCP.

Key words: greenhouse vegetable; environmental impact; life cycle assessment; sustainability; North China Plain

近20年来,中国蔬菜生产发展十分迅速,2015年全国蔬菜种植面积达到2 200万 hm²,占农作物总种植面积的13.2%。其中,设施蔬菜种植因能摆脱自然环境和传统生产条件的束缚和实现高产、高效的生

收稿日期: 2017-10-02; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201202); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0412)

作者简介: 徐强(1990~),男,博士研究生,主要研究方向为资源环境系统模型应用, E-mail: qiangxu2014@163.com

* 通信作者, E-mail: hukel@cau.edu.cn

设施蔬菜种植国家,近年来以每年 10% 左右的速度增长,2014 年设施蔬菜面积已达到 386 万 hm^2 ,产值超过 7 000 亿元. 设施蔬菜产业的迅速发展极大地带动了农民就业并为中国农民的创收起到了积极的作用^[1]. 然而这种反季节生产需要投入大量额外的资源和能源^[2],加之特殊的封闭环境和种植方式,带来了不可忽视的环境问题. 研究表明蔬菜种植相比于大田作物具有更高的环境危害,加剧了全球变暖、环境酸化及水体富营养化等环境影响^[3].

当前对设施蔬菜生产系统的研究较多,主要集中在栽培模式的农学和经济效益^[4]、病虫害防治^[5]、微生物多样性^[6]及产出效率^[7]等. 也有部分研究者对设施蔬菜生产的环境影响进行了研究,但主要集中在土壤质量^[8]、温室气体排放^[9]和对地下水的污染^[10]等某一方面. 然而,由于设施蔬菜生产不再是单纯的蔬菜种植活动,而是以蔬菜生产为目的,包括农资生产、农作生产、农产品运输、消费及废弃物排放等的“从摇篮到坟墓”的生产系统. 传统的环境影响评价方法在对农产品生产进行评价时往往具有片面性. 只有从整个生产系统的角度评价,才有助于全面了解设施蔬菜这种农业生产方式对环境的影响,有利于指导设施蔬菜的可持续发展.

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为一种以产品为导向的全过程评价方法,提供了一种从系统角度评价产品环境影响的思路和标准方法^[11]. 近几年,国外学者已把 LCA 方法广泛应用于农业领域^[12],用其来评价农产品生产和田间管理措施对环境的影响. Andrews 等^[13]研究了魁北克温室番茄供应链的社会效果,提出了生命周期属性评价(LCAA). Boulard 等^[14]应用 LCA 方法对需要加热塑料大棚和玻璃温室、日光温室这 3 种不同种植环境下番茄生产过程环境影响和资源消耗进行了分析评价. Cellura 等^[15]对意大利南部设施蔬菜的生产进行了生命周期评价,认为蔬菜包装和温室建造对环境的影响较大,大棚生产比温室生产可节约能源. 目前像日本和瑞士等国家都拥有农业生命周期评价系统,而国内缺乏完整的农业 LCA 数据库和统一标准,其应用的研究还需要不断完善. 近年来,国内学者也相继开展了农业 LCA 相关研究,为中国农业生命周期研究的探索和发展做出了贡献,然而这些研究在核算农产品生产阶段污染物排放时主要是基于国外已发表的资料^[16~18]. 一方面,估算的排放系数存在很大的不确定性. 另一方面,由

于 LCA 的地域性很强,国外粗放的农业生产模式并不适合中国的情况. 此外,目前对不同生产模式下蔬菜生产体系的环境效应进行 LCA 评价的研究还鲜见报道. 基于此,本文以华北平原长期定位蔬菜生产为例,在对蔬菜生长阶段主要污染物排放进行实测的基础上,结合 LCA 方法对比分析不同生产模式下设施蔬菜(茄子)生产系统的资源消耗和环境排放,以期更为准确、系统和全面地改善设施蔬菜生产的环境问题和实现设施蔬菜可持续发展提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于中国农业大学河北省曲周实验站(36°52'N, 115°01'E),设施蔬菜长期定位实验于 2002 年 3 月开始,研究区属温带半湿润季风气候区,光、热、水等气候资源比较丰富,但受季风的强烈影响,冬春寒冷干燥,夏季温暖多雨,属一年两熟种植区. 年平均温度为 13.2℃,年均降雨量 604 mm,其中 60% 发生于 7~9 月,年蒸发量为 1 841 mm. 供试土壤为盐化潮褐土, pH 为 7.8,耕层(0~20 cm)多年平均有机质含量在 16.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,全氮为 1.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 101.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 139.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾 257.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[6,8,9].

1.2 实验设计

本实验采用的日光温室为拱圆式,长 60 m、宽 7 m. 温室内多种蔬菜轮作(每年两茬),本研究茄子生长于每年 3~8 月,进行了为期 4 a(2013~2016 年)的实验. 实验设 3 个处理 ①常规模式:采用当地农民传统的温室管理模式,主要施用化肥,少量施用有机肥,病虫害的防治以化学防治为主;②综合模式:所施有机肥和化肥用量分别为有机和常规模式施用量的 50%,病虫害防治主要用生物防治方法,严重时用低毒低残留的化学农药进行处理;③有机模式:按照有机蔬菜生产标准,只施用有机肥(堆肥和鸡粪),不使用化肥和农药,病虫害防治以农业措施和物理防治为主(如使用黄板诱杀、防虫网等). 综合和有机模式施氮量同常规模式均为同一水平,各处理灌水情况一致,灌溉方式为大水漫灌(表 1).

1.3 测定方法

氧化亚氮的收集采用静态箱法^[19],测定采用 Agilent 7890A 型气相色谱仪. 土壤硝态氮(NO_3^- -N)

表 1 华北平原不同生产模式设施茄子生产投入产出情况

Table 1 Input and output from an eggplant production facility in the North China Plain (NCP) under different modes of production

项目		传统	综合	有机
化肥/kg·hm ⁻²	N	661.1 ± 234.95	330.5 ± 117.5	—
	P ₂ O ₅	758.4 ± 0.0	379.2 ± 0.0	—
	K ₂ O	630.4 ± 0.0	315.2 ± 0.0	—
有机肥/kg·hm ⁻²	N	182.6 ± 33.4	366.5 ± 65.3	732.9 ± 130.6
	P ₂ O ₅	206.5 ± 29.7	422.6 ± 50.9	878.7 ± 90.3
	K ₂ O	217.3 ± 17.1	406.2 ± 9.3	799.7 ± 35.3
杀虫剂/kg·hm ⁻²		15.1 ± 4.0	5.8 ± 7.0	—
农膜/kg·hm ⁻²		41.67	41.67	41.67
柴油/kg·hm ⁻²		50	50	50
灌溉/m ³ ·hm ⁻²		9 425	9 425	9 425
产量/kg·hm ⁻²		117 171 ± 13 834	122 073 ± 16 345	139 253 ± 15 344

和总磷淋溶采用自流式农田地下淋溶收集装置,每次灌溉后 3~5 d 内用抽水器抽取渗漏液,用流动分析仪(TRAACS2000)测定.有机肥中重金属含量(主要考虑 Cu、Zn、Pb 和 Cd)的浸提采用硝酸-盐酸-氢氟酸消煮法,待测液用 ICP-MS 测定.作物收获时,对每次采摘果实进行称量和记录,取 3 次平均值.各指标的详细测定过程参见文献[6, 8~10].

1.4 生命周期评价法

根据 ISO14040 和 ISO14044^[20, 21] 环境管理标准的 LCA 技术框架,生命周期评价包括以下 4 个步骤:目标定义与范围界定、清单分析、影响评价和结果解释.下面对主要步骤进行简要描述.

1.4.1 目标与范围定义

本研究的目标是通过调查不同生产模式茄子生产生命周期各阶段的投入输出情况,结合田间实测值量化茄子生产生命周期各阶段的资源消耗和污染物的排放特征,识别其节能减排关键调控点,并综合评价以反映不同生产模式下的环境影响总潜值.本研究 LCA 的系统边界设置为从摇篮到农场大门,包括农资生产子系统、农作生产子系统和运输子系统,不包括基础设施建设、农业机械生产、蔬菜消费及废弃物排放等过程(图 1).在运输子系统中,假设传统和综合模式生产的茄子全部由小型

货车运输到当地农贸市场,有机模式茄子通过冷链车被运输至邯郸市中心进行销售.本研究的功能单位为生产 1 t 茄子.

1.4.2 清单分析

清单分析包括数据的收集和对数据进行量化处理.农资生产子系统中化肥、有机肥、杀虫剂、地膜和柴油等生产的污染物排放(包括 CO、CO₂、NO_x、SO₂、CH₄、N₂O 和 COD 等)及能源消耗等计算参考梁龙^[22]的研究结果.

农作子系统中施肥造成的污染物排放如 N₂O 排放,硝酸盐淋洗来源于实测值.根据前人的研究成果, NH₃ 挥发系数取施氮量的 12.5% 进行估算^[23],挥发的氧化氮的量以氧化亚氮挥发的 10% 计算^[24].不考虑钾素的淋失.施用有机肥会伴随重金属的输入,会对环境及人体造成风险,有机肥中重金属的含量来源于实测值.本研究常规和综合模式农药残留率参照 van Collker 等^[25]的研究结果,进入土壤、大气和水体的污染物分别以农药有效成分投入量的 43%、10% 和 1% 计算.有机模式中病虫害防治依靠粘虫板等物理手段,忽略不计.整地等用柴油的污染物排放及能源消耗参考梁龙^[22]的研究结果.

本研究运输子系统主要考虑汽油生产和燃烧过程中的污染物排放及能源消耗,其中汽油生产和燃

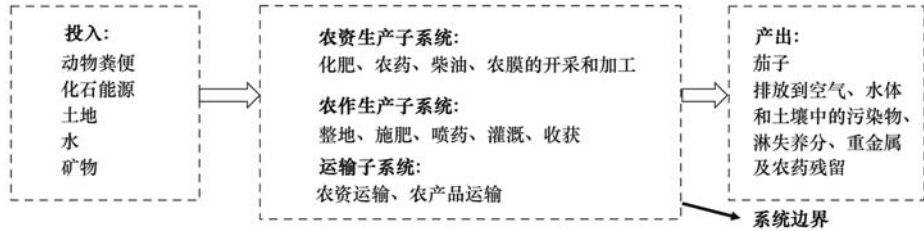


图 1 蔬菜生命周期评价系统边界

Fig. 1 System boundaries in the life cycle assessment of eggplant production

烧的生命周期数据借鉴梁龙^[22]的研究结果. 在本研究中, 运输子系统包括农资运输和农产品的运输. 农资运输包括化肥和有机肥, 其他投入物(如农膜和农药等)的量较少, 不予考虑.

1.4.3 生命周期环境影响评价

影响评价是根据清单分析的结果, 鉴别系统的能源和资源消耗, 污染物排放可能对自然资源、人体健康、生态环境产生的定性或定量影响的系统化过程. 评价包括3个步骤:特征化、标准化和加权评估. 环境影响分为以下9个方面:能源耗竭、土地消耗、水资源量、全球变暖、环境酸化、富营养化、人类毒性、水体毒性和土壤毒性. 不可再生能源的计算根据 Frischknecht 等^[26]的研究结果. 土地以及水资源耗竭的评价参考 Wang 等^[27]的研究结果. 100年内全球变暖势的计算根据 IPCC(2001)^[28]的报告结果. 环境酸化、富营养化和水体毒性势的计算参考 EDIP97 方法^[29]. 人体毒性势的计算根据 CML2001 方法^[30]. 土壤毒性势的计算涉及土壤物理、化学和生物性质, 包括9种指标, 参照

Nemecek 等^[31]的研究结果.

污染物排放的当量系数参考 Wang 等^[27]和 Huijbregts 等^[32]的研究结果. 土地消耗和水资源量的标准化过程参考中国人均环境影响基准值(NBS2000), 权重系数参考梁龙^[22]和 Wang 等^[27]的研究结果.

2 结果与讨论

2.1 资源消耗

茄子生产生命周期过程中的资源消耗包括可再生资源(土地消耗和水资源量)及非再生资源(化石燃料). 在农资生产子系统中, 与常规模式相比, 综合和有机模式的非再生资源消耗分别降低了35.60%和65.06%(表2). 农作生产子系统中, 与常规模式相比, 综合和有机模式的非再生资源消耗分别降低了4.02%和15.84%;土地资源分别降低了4.02%和15.86%;在运输子系统中, 与常规模式相比, 综合和有机模式的非再生资源消耗分别增加了13.04%和82.22%.

表2 华北平原不同生产模式设施茄子生产资源消耗和污染物排放生命周期清单/kg·t⁻¹
Table 2 Resource use and emissions inventories under different modes of greenhouse eggplant production in the North China Plain/kg·t⁻¹

清单名称	农资子系统			农作子系统			运输子系统		
	常规	综合	有机	常规	综合	有机	常规	综合	有机
能源耗竭/MJ·t ⁻¹	983.75	633.58	343.72	18.18	17.45	15.30	133.40	153.41	750.38
土地消耗/m ² ·t ⁻¹	—	—	—	85.34	81.92	71.81	—	—	—
水资源量/m ³ ·t ⁻¹	1.7618	0.9177	0.0434	80.44	77.21	67.68	—	—	—
HC	0.0084	0.0055	0.0022	1.24E-05	1.19E-05	1.04E-05	0.0007	0.0008	0.0020
CO	0.0407	0.0221	0.0018	0.0003	0.0003	0.0002	0.0560	0.0591	0.7495
CO ₂	88.14	46.82	1.95	1.36	1.31	1.15	82.67	98.63	171.37
NH ₃	0.0374	0.0418	0.0621	1.1134	0.8857	0.8234	—	—	—
N ₂ O	0.0015	0.0008	4.34E-05	0.1790	0.1353	0.0922	0.0005	0.0006	0.0023
NO _x	0.3197	0.1826	0.0408	0.0020	0.0020	0.0017	0.1236	0.1476	0.2434
NO ₃ ⁻	—	—	—	2.1173	1.6843	1.5657	—	—	—
SO _x	0.2798	0.1472	0.0006	0.0017	0.0016	0.0014	0.1016	0.1216	0.1772
CH ₄	0.0146	0.0226	0.0421	2.99E-06	2.87E-06	2.51E-06	0.0007	0.0007	0.0089
P _{tot}	0.0121	0.0045	—	0.0165	0.0131	0.0126	—	—	—
NH ₄ ⁺	0.1417	0.0789	0.0083	—	—	—	—	—	—
COD	0.7517	0.4015	0.0414	—	—	—	—	—	—
Cd	8.28E-08	3.98E-08	—	0.0004	0.0004	0.0007	—	—	—
Pb	1.29E-06	6.21E-07	—	0.0015	0.0010	0.0008	—	—	—
Cu	6.47E-07	3.11E-07	—	0.0048	0.0079	0.0152	—	—	—
Zn	3.24E-06	1.55E-06	—	0.0148	0.0237	0.0462	—	—	—
有机磷	—	—	—	0.0005	0.0005	—	—	—	—
除虫菊酯	—	—	—	0.0320	0.0120	—	—	—	—
苯菌灵	—	—	—	0.0325	0.0125	—	—	—	—
多菌灵	—	—	—	0.0325	0.0124	—	—	—	—
代森锰锌	—	—	—	0.0325	0.0125	—	—	—	—

2.2 污染物排放特征

各处理中, 综合和有机模式的全球变暖势较

小, 均为311.20 kg·t⁻¹(以CO₂-eq计)左右, 比常规模式降低了约19.40%(表3). 环境酸化势为

有机模式最小[$2.04 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (以 $\text{SO}_2\text{-eq}$ 计)], 分别比常规和综合模式降低了 27.08% 和 9.01%. 水体富营养化潜势为常规模式最大[$1.50 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (以 $\text{PO}_4\text{-eq}$ 计)], 与之相比, 综合和有机模式分别降低了 22.51% 和 30.59%.

有机肥及农药的使用对环境影响引起的毒性包括人体毒性、水体毒性和土壤毒性. 对于有机模式, 由于不使用农药, 因此不造成人体毒性, 综合模式的人体毒性比常规模式降低了 61.69%. 水体毒性(以 1,4-DCB-eq 计)表现为常规模式最高($31.53 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$), 综合和有机模式接近, 分别为 21.48 和 $23.55 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$, 分别比常规模式降低了 31.89% 和 25.33%. 土壤毒性主要由有机肥带入的重金属及杀虫剂引起, 常规和有机模式土壤毒性较高, 两模式之间无显著差别, 综合模式最低($0.0174 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$). 与常规模式相比, 综合模式土壤毒性降低了 22.11%.

2.3 环境指标

根据 Huijbregts 等^[32] 公布的 2000 年世界人均基准值, 对 3 个子系统的特征化结果进行标准化, 结果如表 3 所示. 可见, 各模式环境影响标准值较大的均为水体毒性、水体富营养化及土壤毒性. 综合模式在能源耗竭、水体毒性、土壤毒性这 3 个方面对环境影响最小. 有机模式在土地消耗、水资源量、全球变暖、环境酸化这 4 个方面引起的环境影响显著低于常规模式, 但是其在能源消耗和土壤毒性方面与常规模式十分接近.

根据 Wang 等^[27] 经专家组评议设定的权重系数结果, 对标准化值进行加权评估得到环境影响综合指数(表 3). 常规模式的环境影响综合指数为 0.855, 综合模式为 0.596, 有机模式为 0.639, 与常规模式相比, 综合和有机模式分别降低了 30.3% 和 25.3% (图 2). 水体毒性、水体富营养化和土壤毒性这 3 个方面对环境影响综合指数的贡献最大, 对各处理均占环境影响综合指数的 97% 以上.

表 3 不同生产模式生产 1 吨设施茄子的潜在环境影响指数

Table 3 Environmental indices per ton of eggplant produced under conventional, integrated and organic modes in the NCP										
环境影响分类	单位	特征化结果			标准化结果			加权平均结果		
		常规	综合	有机	常规	综合	有机	常规	综合	有机
能源耗竭	MJ	1 135.33	804.44	1 109.39	0.0004	0.0003	0.0004	6.57E-05	4.66E-05	6.42E-05
土地资源	m ²	85.35	81.92	71.81	0.0864	0.0829	0.0727	—	—	—
水资源	m ³	82.20	77.21	67.73	0.0309	0.0296	0.0260	0.0049	0.0046	0.0040
全球变暖(以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	386.07	311.20	311.13	0.0562	0.0453	0.0453	0.0067	0.0054	0.0054
环境酸化(以 $\text{SO}_2\text{-eq}$ 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	2.858	2.247	2.044	0.0547	0.0430	0.0391	0.0077	0.0060	0.0055
富营养化(以 $\text{PO}_4\text{-eq}$ 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	1.501	1.163	1.042	0.7902	0.6123	0.5482	0.0948	0.0735	0.0658
人体毒性(以 1,4-DCB-eq 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	0.0104	0.0040	—	0.0001	2.03E-05	—	7.42E-05	2.84E-05	—
水体毒性(以 1,4-DCB-eq 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	31.53	21.48	23.55	6.5288	4.4468	4.8751	0.7183	0.4892	0.5363
土壤毒性(以 1,4-DCB-eq 计)	$\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	0.575	0.820	1.512	0.0941	0.1343	0.2474	0.0224	0.0174	0.0223
综合指数								0.8549	0.5962	0.6393

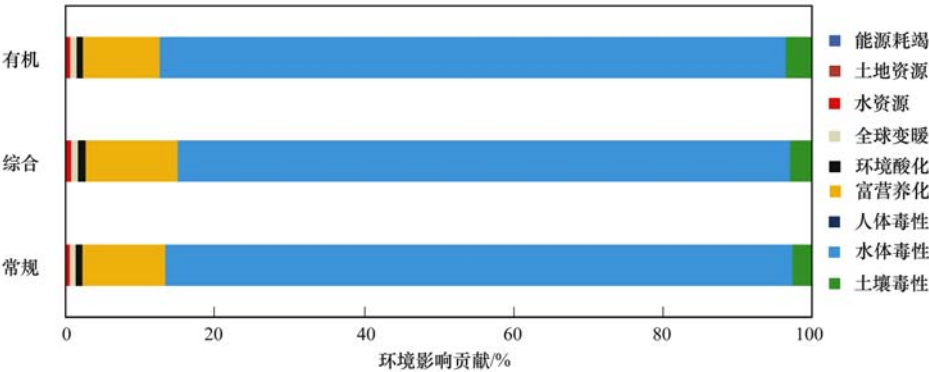


图 2 不同生产模式设施茄子生产环境影响贡献分析

Fig. 2 Analysis of the environmental impact indices of conventional, integrated and organic eggplant production

2.4 不同生产模式下的环境影响热点因子

为进一步探究造成各子系统能源耗竭及污染物排放的热点因子, 各子系统被细分为各个投入物对

环境的影响, 如图 3 所示. 在非再生能源耗竭方面: 对于常规模式, 化肥生产导致的能源消耗占比最大(74.07%), 这主要是农资阶段化肥生产消耗了大

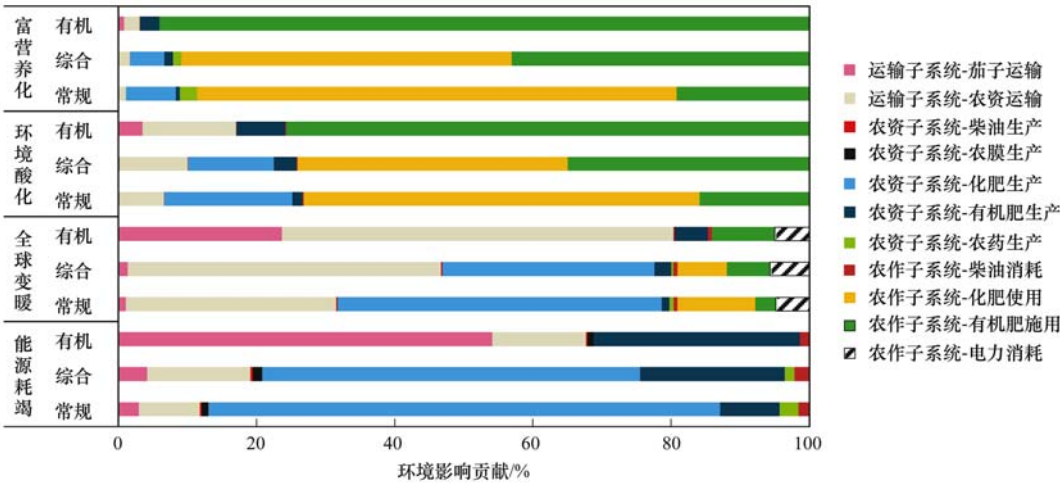


图3 不同生产模式污染物排放的环境影响热点

Fig. 3 Environmental impact of energy depletion, global warming, acidification, and aquatic eutrophication in conventional, integrated, and organic eggplant production modes

量的化石能源所致。中国与国外化肥行业不同，中国氮肥中间体合成氨以煤炭作为主要能源物质，能耗高，环境污染大^[33]。其次是肥料（主要是有机肥）的运输和有机肥的生产，占比各为8.81%和8.59%。茄子运输、农药生产及柴油燃烧所消耗的能源不足8%。综合模式的非再生能源消耗最小，为804.44 MJ·t⁻¹，分别比常规和有机模式减少29.15%和27.49%。

对于有机模式，运输子系统对于茄子生命周期能源耗竭的影响贡献最大，农产品运输和农资运输共占总能源耗竭的67.64%，其中茄子的运输占到54.11%，这主要是由于有机蔬菜运输环节不同于其他模式蔬菜，本研究有机蔬菜搭载冷链车配送到邯郸市中心，而常规蔬菜主要是通过普通货车运输至当地农贸市场。控温式冷链车的耗油量是普通货车的6倍，且有机蔬菜的运输距离远大于普通蔬菜。其次，由于有机模式施用大量的有机肥，农资阶段有机肥的生产能耗占总能耗的29.89%。由于本研究长期定位实验站并未集成规模养殖场，所用有机肥来源于10 km外邯郸市的畜禽养殖场，因此肥料（主要指有机肥）的运输环节也造成了能源的消耗（主要是柴油的燃烧），占比13.53%。本研究各处理资源消耗要高于He等^[18]对同为华北平原的番茄地的估算，其主要原因是他们的研究并未考虑有机肥生产过程中的能耗问题。

在全球变暖方面：常规、综合和有机模式全球变暖潜值（以CO₂-eq计）分别为386.07、311.20和311.13 kg·t⁻¹，综合和有机模式相差不大，但和常规模式相比，综合和有机模式分别降低了19.39%

和19.41%。运输阶段对3个处理都产生较大的影响，对3种模式全球变暖的贡献分别为33.05%、49.42%和84.48%，这主要是由于运输过程中汽油燃烧产生大量的温室气体（CO₂、N₂O和NO_x）所致。对于常规和综合模式，农资阶段化肥的生产也会引起温室气体的排放，分别占47.94%和32.99%；农资阶段对有机模式全球变暖的贡献最低，这是由于有机模式不施用化肥和杀虫剂等。

对于常规、综合和有机模式，农作阶段来源于茄子生长季N₂O的直接排放分别占14.37%、13.48%和9.19%。前人在华北平原的研究也证明相比于大田作物，菜地具有更高的N₂O排放量^[3]，菜地每多消费1 kg肥料氮（N），将增加13 kg碳排放（以CO₂-eq计）^[34]。此外，农作阶段的灌溉用电对各模式全球变暖的影响在4.97%~5.92%。

环境酸化方面：农作生产阶段是排放环境酸化影响物质的最主要来源，环境酸化的影响因子主要是N₂O、NO_x和NH₃。造成氨挥发、N₂O和NO_x排放主要是因为茄子在种植过程中氮肥的大量施用，导致土壤的反硝化作用等氨挥发及氮氧化物的排放^[24]。对于常规和综合模式，施肥（有机肥+化肥）造成的环境酸化分别为73.23%和74.12%（图3）；对于有机模式，施用有机肥对环境酸化的影响占75.72%。施肥对3个模式环境酸化影响差异不大，但总体表现为随施用有机肥的增加，环境酸化加剧。这与Hansen等^[35]和Mattsson等^[36]的研究结论相一致，其研究认为生产单位质量的有机产品将具有更高的环境酸化潜力，增大有机肥用量会导致更多的氮淋洗和径流的损失。

农业生产阶段施肥环节是造成水体富营养化的最重要方面, 主要的影响因子包括 PO_4^{3-} 、 NO_x 、 NH_3 和 NO_3^- , 施肥对各模式水体富营养化的贡献在 88.62%~94.08%。施肥对常规、综合和有机模式水体富营养化潜势(以 $\text{PO}_4\text{-eq}$ 计)分别为 1.33、1.06 和 $0.98 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。茄子的种植过程中, 由于肥料的大量施用(有机肥和化肥)导致 NH_3 挥发和 NO_3^- 的淋洗, 在本研究中, 由于有机和综合模式的 NO_3^- 淋洗率低于常规模式^[37], 因此, 有机和综合模式由 NO_3^- 淋洗造成的富营养化也低于常规模式, 这与周冉等^[38]的研究结果相一致。

人体毒性, 水体毒性和土壤毒性主要是由农业生产阶段施入的有机肥和杀虫剂引起的。常规和综合模式的人体毒性来自施入的杀虫剂及杀菌剂。在本研究中, 主要是由有机磷、代森锰锌、除虫菊酯、苯菌灵和多菌灵引起。由于有机模式不施用杀虫剂, 因此不造成人体毒性(图 4)。

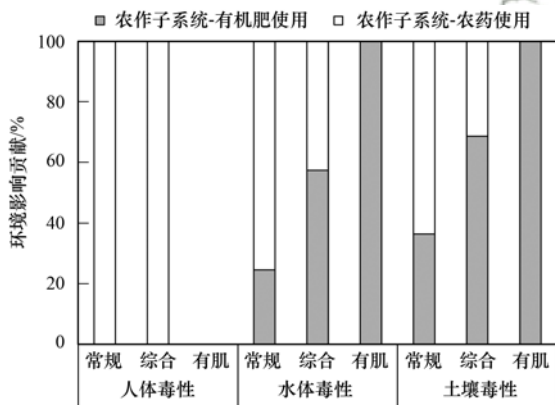


图 4 不同生产模式环境毒性的热点因子

Fig. 4 Environmental impact of toxicity to humans, aquatic eco-toxicity, and soil eco-toxicity under conventional, integrated, and organic eggplant production modes

在本研究中, 对综合环境影响指标贡献最大的是水体毒性。常规、综合和有机模式的水体毒性(以 1,4-DCB-eq 计)指标分别为 0.7183、0.4892 和 $0.5363 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。与常规模式相比, 综合和有机模式的水体毒性分别降低了 31.89% 和 25.33%。对常规模式, 有机肥对水体毒性的贡献为 24.59%, 杀虫剂的贡献达到 75.41%; 对综合模式, 有机肥和杀虫剂的贡献分别为 57.40% 和 42.60%; 对于有机模式, 全部来自有机肥。Nicoletti 等^[39]的研究认为, 有机生产系统中有机肥的大量施用将导致生态毒性(土壤和水体毒性)风险逐渐增加, 甚至超过常规生产系统, 本文的研究结果与之基本吻合。

各模式土壤毒性表现为常规和有机模式十分接

近, 均显著高于综合模式, 常规模式土壤毒性主要是由土壤中的农残引起(占 63.63%), 36.37% 是由有机肥带入的重金属引起的; 对于综合模式, 主要是由施用有机肥引起, 占 68.57%, 少量由杀虫剂引起(31.43%); 有机模式由于不施用杀虫剂, 土壤毒性主要由有机肥带入的重金属引起。

2.5 环境影响的减缓措施

目前对于有机农业的认识, 大量研究表明: 相比于传统农业, 有机农业具有更高的环境减排潜力, 更小的环境酸化和富营养化潜力, 并能有效减少能源耗竭和持续提高土壤肥力^[40~42], 但也有部分研究认为有机农业施入大量的畜禽粪便不可避免的会带入大量重金属, 给土壤和水体带来环境威胁, 甚至超过常规生产系统^[36]。本研究也认为有机农业并非是无可挑剔的, 有机农产品运输环节比常规农产品消耗更多的能量并产生更多的碳排放, 有机肥的大量施用也会引起土壤毒性的加剧, 本研究中在能源耗竭和土壤毒性方面有机和常规模式十分接近, 在这两方面, 有机模式没有显示出环境优势。另外, 本研究结果表明: 对环境影响综合指数贡献最大的是水体毒性、水体富营养化和土壤毒性, 都来自农业生产子系统。由于综合模式几乎不施用农药且有机肥用量仅为有机模式的 50%, 有机肥带入的重金属含量大大降低, 因此, 水体毒性和土壤毒性相比于常规模式分别降低 31.90% 和 22.11%。水体富营养化比常规模式降低 22.51%。可见, 与常规和有机模式相比, 综合模式可在提高产量的同时, 降低对环境的负影响, 为最佳的生产模式。

优化田间管理被认为是应对农业生产中环境排放热点的有效措施。在本研究中, 施肥很大程度上影响着作物生产的环境影响潜值。Brentup 等^[24]的研究表明高产高效是获得高环境效益的途径, 不断提高产量、优化施肥量和施肥方式以减少环境排放是实现环境和经济协调发展的根本途径。优化施肥、提高肥料利用率可有效减少 N_2O 排放、氨挥发、氮磷的径流和淋溶损失^[43]。轮作、豆科固氮、填闲作物、物理除虫、减少饲料的重金属添加等可以有效提高土壤肥力、控制病虫害、维持生物多样性和提高产量^[42]。以沼气为纽带的田间施肥管理模式对节约能源与环境减排具有非常实际的意义^[7]。未来, 无公害蔬菜将是中国大力推广的蔬菜生产模式, 如果能优化田间管理措施保证清洁生产将极大地降低蔬菜生产的环境负影响并提高其可持续性。

3 结论

本研究采用田间实测结合生命周期评价方法, 对中国华北地区常规、综合及有机 3 种设施茄子生产模式的农资、农作及运输阶段所产生的资源消耗及污染物排放进行了清单分析和环境影响评价。综合模式的环境影响综合指数最低, 为 0.596, 分别比常规和有机模式降低了 30.3% 和 6.7%, 该模式显著降低了设施茄子农作子系统的污染物排放, 为最佳生产模式。水体毒性、土壤毒性及水体富营养化对各模式环境影响贡献均最大, 杀虫剂和有机肥是造成环境污染的热点因子。当前华北平原蔬菜种植系统迫切需要优化田间管理方式, 建议改进有机肥生产技术、减少氮磷损失、提高肥料利用效率。田间实测结合生命周期评价方法对精量化评估中国农产品生产对环境的综合影响, 促进中国农产品生产的可持续性, 具有广阔的应用前景和较高的实用价值。

致谢: 感谢哥本哈根大学何雪清博士在 LCA 方法, 中国农业大学张鸿渊博士在曲周实验站调研上提供的帮助!

参考文献:

- [1] 张真和, 陈青云, 高丽红, 等. 我国设施蔬菜产业发展对策研究(上)[J]. 蔬菜, 2010, (5): 1-3.
- [2] 沈军, 陈青云, 李中明, 等. 三种类型温室建造的生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 180-187.
Shen J, Chen Q Y, Li Z M, *et al.* Life cycle assessment (LCA) on three types of greenhouses construction[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 180-187.
- [3] Diao T T, Xie L Y, Guo L P, *et al.* Measurements of N₂O emissions from different vegetable fields on the North China Plain[J]. Atmospheric Environment, 2013, 72: 70-76.
- [4] 解永利, 李季, 杨合法. 日光温室不同生产模式下蔬菜品质变化的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 718-721.
Xie Y L, Li J, Yang H F. Quality of vegetables in different cultivation patterns in greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 718-721.
- [5] 樊平声, 陈罡, 冯伟民, 等. 江苏省设施蔬菜病虫害综合防治技术[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 189-191.
Fan P S, Chen G, Feng W M, *et al.* Diseases and insect pests integrated control technology for protected vegetable in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 189-191.
- [6] Li Y F, Li J, Zheng C Y, *et al.* Effects of organic, low input, conventional management practices on soil nematode community under greenhouse conditions [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2014, 64(4): 360-371.
- [7] 王小龙, 韩玉, 陈源泉, 等. 基于能值分析的无公害设施蔬菜生产系统效率和可持续性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2136-2145.
- [8] Wang X L, Han Y, Chen Y Q, *et al.* Efficiency and sustainability evaluation of a pollution-free vegetable production system based on emergy analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2136-2145.
- [9] 梁丽娜, 李季, 杨合法, 等. 不同蔬菜生产模式对日光温室土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 186-191.
Liang L N, Li J, Yang H F, *et al.* Effect of organic, low-input and conventional production model on soil quality in solar greenhouse vegetable growing system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 186-191.
- [10] Han H, Teng Y M, Yang H F, *et al.* Effects of long-term use of compost on N₂O and CO₂ fluxes in greenhouse vegetable systems [J]. Compost Science & Utilization, 2017, 25(S1): S61-S69.
- [11] 滕艳敏, 韩卉, 郝梓依, 等. 不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和 COD 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 759-768.
Teng Y M, Han H, Hao Z Y, *et al.* Effect of vegetable cropping system on total nitrogen, phosphorus and COD in farmland leachate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 759-768.
- [12] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, *et al.* Life cycle assessment: part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. Environment International, 2004, 30(5): 701-720.
- [13] Brentrup F, Küsters J, Kuhlmann H, *et al.* Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14(3): 221-233.
- [14] Andrews E, Lesage P, Benoît C, *et al.* Life cycle attribute assessment: case study of Quebec greenhouse tomatoes [J]. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13(4): 565-578.
- [15] Boulard T, Raeppe C, Brun R, *et al.* Environmental impact of greenhouse tomato production in France [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(4): 757-777.
- [16] Cellura M, Longo S, Mistretta M. Life cycle assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 28: 56-62.
- [17] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 基于生命周期的循环农业系统评价[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2795-2803.
Liang L, Chen Y Q, Gao W S. Integrated evaluation of circular agriculture system: a life cycle perspective[J]. Environmental Science, 2010, 31(11): 2795-2803.
- [18] 王效琴, 吴庆强, 周建斌, 等. 设施番茄生产系统的环境影响生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2940-2947.
Wang X Q, Wu Q Q, Zhou J B, *et al.* Life cycle assessment of tomato production in greenhouses [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(11): 2940-2947.
- [19] He X Q, Qiao Y H, Liu Y X, *et al.* Environmental impact assessment of organic and conventional tomato production in urban greenhouses of Beijing City, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 134: 251-258.
- [20] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, *et al.* An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and

- environmental factors in semiarid grassland [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(1): 119-127.
- [20] ISO 14040: 2006, Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework[S].
- [21] ISO 14044: 2006, Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines[S].
- [22] 梁龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [23] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(2): 253-259.
- He F Y, Yin B, Jin X X, *et al.* Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing Suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(2): 253-259.
- [24] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, *et al.* Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, **20**(3): 265-279.
- [25] van Calster K J, Berentsen P B M, de Boer I M J, *et al.* An LP-model to analyse economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: model presentation and application for experimental farm "de Marke" [J]. *Agricultural Systems*, 2004, **82**(2): 139-160.
- [26] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H J, *et al.* Implementation of life cycle assessment methods ecoinvent data v1.1. ecoinvent report 3[M]. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent), 2004. 116.
- [27] Wang M X, Wu W L, Liu W N, *et al.* Life cycle assessment of the winter wheat-summer maize production system on the North China Plain [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2007, **14**(4): 400-407.
- [28] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [29] Hauschild M, Wenzel H. Environmental assessment of products. Volume 2: scientific background [M]. London: Chapman and Hall, 1998. 565.
- [30] Guinée J B, Gorée M, Heijungs R, *et al.* Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Parts 1 and 2. Ministry of housing, spatial planning and environment (VROM) and Centre of environmental science (CML) [M]. Netherlands: Den Haag and Leiden Press, 2001.
- [31] Nemecek T, von Richthofen J S, Dubois G, *et al.* Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, **28**(3): 380-393.
- [32] Huijbregts M A J, Thissen U, Guinée J B, *et al.* Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(4): 541-573.
- [33] 段宁等. 化肥企业清洁生产审核指南[M]. 北京: 新华出版社, 2006. 33-40.
- Duan N. Audit guide of fertilizer enterprise cleaner production [M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2006. 33-40.
- [34] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(3): 503-517.
- Wang J G, Lin S, Li B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(3): 503-517.
- [35] Hansen B, Alrøe H F, Kristensen E S. Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, **83**(1-2): 11-26.
- [36] Mattsson B, Wallén E. Environmental life cycle assessment (LCA) of organic potatoes[J]. *Acta Horticulturae*, 2003, **619**: 427-435.
- [37] 韩卉. 有机种植模式下的土壤氮素平衡及氮素转化关键微生物群落研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [38] 周冉, 班红勤, 侯勇, 等. 京郊典型作物生产体系施肥环境影响的生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(5): 1042-1051.
- Zhou R, Ban H Q, Hou Y, *et al.* Life cycle assessment of environmental impacts by fertilization in major cropping systems of a Peri-urban area of Beijing, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(5): 1042-1051.
- [39] Nicoletti G M, Notarnicola B, Tassielli G. Comparative life cycle assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2002, **10**(3): 283-296.
- [40] Stolze M, Piore A, Häring A, *et al.* Environmental impacts of organic farming in Europe [A]. In: Dabbert S, Lampkin N, Michelsen J, *et al.* (Eds.). *Organic Farming in Europe: Economics and Policy* [M]. Stuttgart-Hohenheim: University of Hohenheim, 2000. 22-30.
- [41] Gattinger A, Muller A, Haeni M, *et al.* Enhanced top soil carbon stocks under organic farming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(44): 18226-18231.
- [42] Schader C, Stolze M, Gattinger A. Environmental performance of organic farming [A]. In: Boye J, Arcand Y (Eds.). *Green Technologies in Food Production and Processing* [M]. New York: Springer, 2012. 183-210.
- [43] Wu H J, Gao L M, Yuan Z W, *et al.* Life cycle assessment of phosphorus use efficiency in crop production system of three crops in Chaohu Watershed, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **139**: 1298-1307.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)