

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.005

利用生态农业产业链技术控制农业面源污染

李红娜,叶 婧,刘 雪,耿 兵,田云龙,朱昌雄

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要:分析了中国农业面源污染现状及成因,认为农业面源污染是造成水体污染的最大问题。为了改善水体环境,从生态农业产业链技术的含义和内容出发,提出以“种—养—加—生”循环一体化的产业链技术体系来控制农业面源污染,保护水环境质量,即以源头无害化、过程资源化、末端生态化和控制规模化为原则,进行控制农田养分流失的生态种植、低污染零排放的生态养殖、无公害的生态饲料生产、以发酵垫料为主要原料的生物腐殖酸肥料加工和生态农业产业园区规划与建设等。这些技术的联控应用,能强化养分、食物链的循环延伸,是控制农业面源污染的有效方法,可以实现农业面源污染的零排放控制,改善水环境质量。

关键词:水污染控制;农业面源污染;生态农业产业链

中图分类号:X52;S19 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)05-0024-06

Control agricultural non-point pollution with technology of eco-agricultural industrial chain

LI Hongna, YE Jing, LIU Xue, GENG Bing, TIAN Yunlong, ZHU Changxiong

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The author of this paper thought that agricultural non-point pollution was the most important source of water pollution based on the analysis of the present situation of the agricultural non-point pollution in China and its reasons. In order to improve the water environment, the meaning and content of the eco-agricultural industrial chain was introduced. Based on this conception, the eco-agricultural industrial chain, integrating a whole circular system with different sessions of crop farming, breeding, agricultural products processing and living, was innovatively put forward to control the agricultural non-point pollution and protect the water environment systematically for the first time in this paper. Concretely, in the principle of source harmlessness, process resource utilization, end ecological treatment and controlling in large-scale, several important techniques were included as manufacturing of ecotypic feeds, ecological breeding with zero discharge of pollution, production of biological humic acid fertilizer with fermentation bed padding, eco-planting with controlling of nutrients release and programming and construction of eco-agricultural park. In combined application of these techniques, the eco-agricultural industrial chain technology was proved to be an efficient method to achieve both the well control of agricultural non-point pollution and effective improvement of the water quality.

Key words: water pollution control; agricultural non-point pollution; eco-agricultural industrial chain

基金项目:国家青年自然科学基金(51308537);公益性行业(农业)科研专项(201303094);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项
作者简介:李红娜(1986—),女,博士研究生,研究方向为水治理理论与技术,农业面源污染控制。E-mail:lihongna828@163.com
通信作者:朱昌雄,研究员。E-mail:zhucx120@163.com

农业面源污染又称农业非点源污染,是指在农业生产活动中,氮磷等营养物质、农药、重金属及其他污染物,从非特定的地点,以不同的形式对大气、土壤和水体环境形成污染。数据表明,进入水体的TN、TP中,来自工业废水的仅占10.0%~16.0%,而农业面源污染和生活污水的贡献占绝大多数。当前中国受农业面源污染影响的农田有2 000万hm²,将近50.0%的地下水被农业面源污染。农业面源污染已成为当前水体污染中最大的问题,严重影响农业和环境的可持续发展^[1]。

1 农业面源污染的现状成因分析

1.1 现状

据第一次全国污染源普查的结果,2007年巢湖流域TN、TP排放量分别为2.74万t和0.33万t,其中来自农业面源的TN、TP分别占48%和32%;滇池每年氮磷入湖总量为1.72万t,其中来自农业面源污染的有4 719.1t,占滇池流域氮磷污染总量的27.4%^[2];根据《太湖流域水环境综合治理方案》中的估算,来自农业面源污染的TN和TP分别占太湖流域TN和TP总污染量的77.0%和33.4%^[3]。农业面源污染的贡献率远远超过来自工业和城市生活的点源污染,已成为中国各重要流域的主要污染源^[1,4]。因此,要从根本上解决中国的水环境污染问题,必须把农业面源污染防治纳入环境保护的重要议程^[5-6]。

1.2 成因分析

造成农业面源污染的途径主要包括农药污染、化肥污染、养殖业污染、农业废弃物污染及农村生活污染等。中国的农药使用量居世界第一位,1990年为73.3万t,到2009年已增长至226.2万t;而且所使用的农药一般毒性大且具有化学和生物稳定性^[7],利用率不到30.0%,未利用的部分则流失在土壤、水体和空气中^[8]。中国化肥的平均施用量高达400 kg/hm²,超过世界平均水平的2倍,其中主要粮食作物的氮、磷、钾肥利用率虽已经进入国际上公认的适宜范围,但仍处于较低的水平^[9],未被利用的养分通过径流、淋溶等方式进入环境,污染了土壤、大气和水体。畜禽粪便的淋溶性强,能通过地表径流污染水体。2001年畜禽养殖的粪便量为21亿t,为同期工业废弃物量的2.7倍;2010年畜禽养殖的粪便量达到了45亿t^[10]。水产养殖业中,鱼类粪便、饵料沉淀以及化学药品肥料也会对湖泊、水库的生态环境造成很大的污染^[11]。随着人口的迅速增长,中国农村每年产生的生活污水90多亿t、生活垃圾约2.8亿t,这些污水和垃圾几乎全部直排或露天堆

放,而人粪尿年产生量为2.6亿t,造成大量氮磷污染。这些生活污水、生活垃圾的产生和积累加剧了农村生态环境的恶化,是农村面源污染的主要来源之一。现阶段中国农业面源污染的状况日益恶化,严重影响着水环境的保护工作^[12-13],因此,研发面源污染控制的高效技术是必要的。

2 生态农业产业链技术

生态农业产业链技术以减量化、再利用、资源化的循环经济理念指导农业生产,使农业生产方式由“资源—产品—废弃物”的传统模式向“资源—产品—再生资源—产品”的循环模式转变,实现物质能量的相互转换和多层次利用^[14]。农业产业链适合建设在集种植、养殖、农副产品为一体的农业区域,通过产业链的延伸将各相关农业产业串联起来,在有效降低生产成本、增加利润的同时,还可以达到控制农业面源污染、保护水质的目的^[15]。

国内外的案例都已充分证明了产业链整合对农业生产和水环境质量改善的重要作用^[16-17],如,周小萍等^[18]提出了适宜于不同区域的生态农业产业化模式实施途径,在结合典型案例的基础上,重点探讨了各自的适宜范围和实施方案;杨苑苗^[15]提出了基于种植业之间、养殖业与种植业之间以及种养殖与观光业之间的能量循环的农业生态园模式。然而,更多的生态农业产业链的相关研究是基于其运行规律^[19]、稳定性评价^[20]和动力学机制^[21]等的探讨,系统的技术体系研究还有待进一步完善和综合,加之目前中国以生态农业产业链技术控制农业面源污染的相关研究和提法还比较少,相关的理论研究和创新工程实践更是缺乏。考虑到中国当前水环境污染形势的严峻性及农业面源污染控制的重要性,基于生态农业产业链控制农业面源污染的相关技术创新和内容完善的工作亟待开展。

3 “种—养—加—生”循环一体化产业链技术体系

“种—养—加—生”循环一体化的生态工业园,是通过集合种植、养殖、农产品加工、农村生活等各自独立链条而构建的循环产业链,以实现物质能量的逐层利用和循环再生。笔者首次提出利用“种—养—加—生”循环一体化利用的产业链技术体系来控制农业面源污染、保护水环境的思路。该技术体系以源头无害化、过程资源化、末端生态化和控制规模化为原则,通过各项技术的联控应用,实现养分、食物链的循环延伸与农业面源污染物的零排放控制,有效改善当前的水质状况。本体系涉及的关键

技术主要包括以下几个方面。

3.1 无公害的生态饲料生产技术

随着养殖业的集约化发展,高效与防病成为生产中的重要指标,导致含激素与抗生素等的饲料添加剂大量使用,造成了重大的污染和危害^[22]。生态饲料具有维持动物体内微生物菌群平衡、增强机体免疫能力、营养促进消化和防病治病的能力^[23],具有显著加快畜禽的生长速度、防病抗病、减少饲料用量和提高瘦肉率等作用^[24]。虽然目前生态饲料存在相对成本较高、配方研究和加工工艺缺乏等不足^[25],但是生态饲料对推动农业可持续发展的重要意义毋庸置疑,无公害的生态饲料生产将有利于养殖源头污染的高效控制。

3.2 低污染零排放的生态养殖技术

生态养殖是一种以低消耗、低排放、高效率为基本特征的可持续畜牧业发展模式。发酵床养猪技术是结合现代微生物发酵技术提出的一种环保、安全、有效的生态养猪方法^[26],其基本模式是将锯末、谷壳、玉米秸秆等农副产品作为垫料,利用固体发酵剂对垫料建堆发酵,然后铺进猪舍形成垫床。猪粪尿直接排在垫料上,迅速被垫料中的有益微生物分解转化,整个饲养过程达到零排放、无臭味、无污染。

唐建阳等^[27]研究了不同养殖方式下的仔猪行为特征,结果表明,发酵床养殖的仔猪,探究行为明显增加,争斗行为减少,同时营养指数和健康指数都高于传统方式饲养的仔猪。此外,相关的研究表明,利用发酵床养猪有利于仔猪食用和感官品质的提升^[28-29]以及猪舍内 NH_3 和 H_2S 气体浓度的降低^[30]。因此发酵床养猪模式是一种经济效益、环保效益俱佳的新型养猪模式,值得在农业面源污染控制的实践中推广应用。

3.3 以发酵垫料为主要原料的生物腐殖酸肥料加工技术

废弃垫料富含腐殖酸、有益微生物和作物所需的丰富营养成分(N 、 P_2O_5 和 K_2O 养分之和大于等于 7%),是一种具有潜在价值的资源。废弃垫料资源化利用的原则是“因地制宜、因量选型”,可以将废弃垫料作为食用菌培养基的主料,或经简单粉碎加工后作有机肥。黄义彬等^[31]将发酵床垫料堆肥 30 d 腐熟后, pH 值和有机质、全氮、全磷、总养分的质量分数分别达到 7.2、37.8%、2.5%、3.7% 和 7.6%,达到了中国农业行业标准中关于有机肥料的相关规定。废弃的发酵床垫料被评定为可生产综合有机肥的安全肥源^[32]。本课题组测试了模拟降水条件下不同肥料对养分流失的影响,结果表明,配施生物腐殖酸后,化肥、普通有机肥、生物有机肥所产

生的径流量污染分别降低了 9.2%、9.7% 和 17.5%;TN 流失分别降低了 27.8%、42.2% 和 50.1%;COD 流失分别降低了 36.6%、20.7% 和 16.4%。可见,以发酵垫料为原料的生物腐殖酸肥料不仅具有丰富的营养价值,而且还能有效减少农田径流中的污染物,具有可观的环境效益。

3.4 控制农田养分流失的生态种植技术

3.4.1 采取农艺措施

秸秆覆盖能显著减少地表径流 73.9% ~ 86.2%,其减少养分流失和增加产量的效果均优于地膜覆盖^[33]。黄豆和玉米垄间作更能降低养分流失,对坡耕地均能不同程度地截留土壤和氮磷^[34]。此外,平衡施肥能促进植物对土壤中各种养分的均衡吸收,减少氮磷流失和径流量,可很好地从源头控制农田的养分流失^[35]。

3.4.2 控制灌排模式

高焕芝等^[36]采取控制灌排模式种植水稻,两年田间试验的成果表明,控制灌排模式种植水稻较普通灌排模式节水 16.7%,增产 7.1%,排水总量减少 54.0%,水稻全生育期稻田排水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 TP 的流失总量分别减少 38.1%、82.3% 和 52.2%,节水减排和降污效果显著。Wesström 等^[37]得出了相似的结论,进一步的研究表明,磷的流失量在传统的地下灌溉中与土壤温度相关,而在控制灌排模式下,受径流速度的影响更明显。

3.4.3 改善施肥体系

应用测土配方施肥体系,建立氮、磷、钾等养分平衡的优化施肥模式;结合当地土壤肥力情况,调整施肥结构和施肥方式,实现农田养分科学管理,以达到控制养分流失的目的。应用缓控释肥后,肥料利用率可提高 30% 以上,大大减少化肥使用量^[38]。控失肥是利用固定化技术制成的养分控失剂,多项应用试验表明,控失肥可提高作物产量和生产效益,同时可提高肥料利用率^[39]。

总之,控制农田养分流失,应综合考虑当地的降雨径流情况、耕地类型、种植模式及耕作方式等因素,采用多种生态种植技术。

3.5 农村生活污水原位消纳与循环利用技术

量大而面广的农村生活污水已成为影响水质的主因,研究和开发高效除污的处理方案,采用因地制宜的技术措施,是控制农村生活污水污染的有效途径。对于居住较分散、难以布设管网的地区,可以采取厌氧/好氧—仿生态塘高效处理技术。该技术在巢湖市大汤村的示范效果较好,日处理污水 180 m³ (3 000 余人生活污水),TN、TP 去除率均达到 60.0%;对居住集中的地区,采取“户用污水—分散

- 模式研究[J]. 农业环境与发展,2008,25(5):87-90. (SUN Zhixu,WANG Honghua,YAN Tingting. Agricultural non-point pollution control model research in Dianchi Lake [J]. Agro-Environment and Development,2008,25(5): 87-90. (in Chinese))
- [3] 张红举,陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护,2010,26(3):87-91. (ZHANG Hongju, CHEN Fang. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2010,26(3): 87-91. (in Chinese))
- [4] 金相灿. 我国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社,1995.
- [5] 马国霞,於方,曹东,等. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测[J]. 环境科学学报,2012,32(2):490-498. (MA Guoxia,YU Fang,CAO Dong,et al. Calculation of agricultural non-point source pollution emission in China and its long-term forecast [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(2): 490-498. (in Chinese))
- [6] POUDEL D D,LEE T,SRINIVASAN R,et al. Assessment of seasonal and spatial variation of surface water quality, identification of factors associated with water quality variability, and the modeling of critical nonpoint source pollution areas in an agricultural watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,68(3): 155-171.
- [7] 冉聃,鲁建江,姚晓瑞,等. 新疆典型农业地区土壤中有機氯农药(OCPs)分布特征及风险评价[J]. 农业工程学报,2012,28(3):225-229. (RAN Dan,LU Jianjiang, YAO Xiaorui,et al. Distribution and risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in soils of typical agricultural regions in Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(3): 225-229. (in Chinese))
- [8] PARRIS K. Impact of agriculture on water pollution in OECD countries: recent trends and future prospects[J]. Water Resources Development,2011,27(1): 33-52.
- [9] 中华人民共和国农业部. 中国三大粮食作物肥料利用率研究报告[R]. 北京:中华人民共和国农业部,2013.
- [10] 吴岩,杜立宇,高明和,等. 农业面源污染现状及其防治措施[J]. 农业环境与发展,2011,28(1):64-67. (WU Yan,DU Liyu,GAO Minghe,et al. The current agricultural non-point pollution condition and prevention measures [J]. Agro-Environment and Development,2011,28(1): 64-67. (in Chinese))
- [11] 蔡继晗,李凯,郑向勇,等. 水产养殖对环境的影响及其防治对策分析[J]. 水产养殖,2010,31(5):32-41. (CAI Jihan,LI Kai,ZHENG Xiangyong, et al. Effects of aquaculture on environment and the prevention measures [J]. Journal of Aquaculture,2010,31(5): 32-41. (in Chinese))
- [12] SUN Bo,ZHANG Linxiu,YANG Linzhang, et al. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures[J]. Ambio,2012,41(4): 370-379.
- [13] ONGLEY E D,ZHANG X L,YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution,2010, 158(5): 1159-1168.
- [14] 翟慧卿,吕萍. 农业产业链理论研究综述[J]. 甘肃农业,2010(11):22-25. (ZHAI Huiqing,LYU Ping. Research review of agricultural industry chain[J]. Gansu Agriculture,2010(11): 22-25. (in Chinese))
- [15] 杨苑苗. 甘肃省循环农业模式研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2011.
- [16] 冯晗. 开放环境下中国农业产业链演进研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [17] MIN Qingwen,HE Lu,ZHANG Dan. Agricultural heritage research in China: progress and perspectives[J]. Journal of Resources and Ecology,2011,2(1): 1-7.
- [18] 周小萍,陈百明,卢燕霞,等. 中国几种生态农业产业化模式及其实施途径探讨[J]. 农业工程学报,2004,20(3):296-300. (ZHOU Xiaoping,CHEN Baiming,LU Yanxia, et al. Several eco-agricultural industrialization modes and practice ways for Chinese ecological agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(3): 296-300. (in Chinese))
- [19] 崔和瑞. 基于循环经济理论的区域农业可持续发展模式研究[J]. 农业现代化研究,2004,25(2):94-98. (CUI Herui. On patterns of regional agricultural sustainable development based on cycle economic theory [J]. Research of Agricultural Modernization,2004,25(2): 94-98. (in Chinese))
- [20] 卢晓丽. 基于共生理论的农业产业链稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [21] 崔春晓,邹松岐,张志新. 农业产业链国内外研究综述[J]. 世界农业,2013(1):105-109. (CUI Chunxiao,ZOU Songqi,ZHANG Zhixin. Research review of agricultural industrial chain in China and abroad [J]. World Agriculture,2013(1): 105-109. (in Chinese))
- [22] PIETERS A. Safe food starts with safe feed: technology [J]. The Dairy Mail,2013,20(8): 86-87,89.
- [23] 黄美珍,李志棠. 微生态制剂在虾病防治应用的研究进展[J]. 中山大学学报:自然科学版,2000(增刊1):70-79. (HUANG Meizhen,LI Zhitang. Development of research on the application of microbial ecological agents to prevent and cure of the diseases for shrimp [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000 (Sup1):70-79. (in Chinese))
- [24] BEAUCHEMIN K A,YANG W Z,RODE L M. Effects of grain source and enzyme additive site and extent of nutrient digestion dairy cows[J]. Dairy Science,1999,82(2): 378-390.
- [25] 刘以洪,朱光明. 云南省牟定县猪生态饲料开发利用现状及对策[J]. 养殖与饲料,2011(1):78-79. (LIU

- Yihong, ZHU Guangming. Present situation and countermeasures of exploitation and utilization of ecological pig feeds in Mouding County of Yunnan Province[J]. Poultry and Feeds, 2011 (1): 78-79. (in Chinese))
- [26] PATEL N, JHA D K, SHRIVASTAVA A K, et al. Performance of Gramapriya poultry birds under different systems of management [J]. Journal of Agricultural Technology, 2013, 9(7): 1769-1774.
- [27] 唐建阳, 郑雪芳, 刘波, 等. 微生物发酵床养殖方式下仔猪行为特征[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(4): 34-38. (TANG Jianyang, ZHENG Xuefang, LIU Bo, et al. Observation of piglets behavior under the rearing pattern on microbial fermentation bed[J]. Poultry and Veterinary, 2012, 44(4): 34-38. (in Chinese))
- [28] PATTON B S, HUFF-LONERGAN E, HONEYMAN M S, et al. Effects of deep-bedded finishing system on market pig performance, composition and pork quality [J]. Animal, 2008, 2(3): 459-470.
- [29] MORRISON R S, LEE J J, HILBRANDS A M. A note on the effects of two versus one feeder locations on the feeding behaviour and growth performance of pigs in a deep litter, large group housing system [J]. Applied Animal Behavior Science, 2007, 107(23): 157-161.
- [30] 魏玉明, 郝怀志, 董俊, 等. 发酵床养猪对猪舍空气质量的影响[J]. 当代畜牧, 2012(7): 7-8. (WEI Yuming, HAO Huaizhi, DONG Jun, et al. Effects of fermentation bed on air quality in the piggery[J]. Modern Poultry, 2012(7): 7-8. (in Chinese))
- [31] 黄义彬, 李卿, 张莉, 等. 发酵床垫料无害化处理技术研究[J]. 贵州畜牧兽医, 2011, 35(5): 3-7. (HUANG Yibin, LI Qing, ZHANG Li, et al. Harmless utilization of fermentation padding materials[J]. Guizhou Poultry and Veterinary, 2011, 35(5): 3-7. (in Chinese))
- [32] 陆扬, 吴淑杭, 周德平, 等. 发酵床养猪垫料的养分转化与植物毒性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1409-1412. (LU Yang, WU Shuhang, ZHOU Deping, et al. Nutrient transformation and phytotoxicity of pig litters under pig-on-litter (POL) system[J]. Journal of Argo-Environment Science, 2011, 30(7): 1409-1412. (in Chinese))
- [33] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6091-6101. (LIN Chaowen, LUO Chunyan, PANG Liangyu, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6091-6101. (in Chinese))
- [34] 张丽, 刘玲花, 程东升, 等. 不同农艺措施对坡耕地水土及氮磷流失的控制[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 21-25. (ZHANG Li, LIU Linghua, CHENG Dongsheng, et al. Impact of different agronomic measures on control of nitrogen, phosphorus, soil and water loss on sloping land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 21-25. (in Chinese))
- [35] 王静, 郭熙盛, 王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 331-335. (WANG Jing, GUO Xisheng, WANG Yunqing. Effects of straw mulch and balanced fertilization on nitrogen loss from farmland in Chaohu Lake Region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 331-335. (in Chinese))
- [36] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 1-4. (GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Water Saving and Irrigation, 2009(9): 1-4. (in Chinese))
- [37] WESSTRÖM I, MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J]. Agriculture Water Management, 2007, 87(3): 229-240.
- [38] 王艳华, 邱现奎, 胡国庆, 等. 控释肥对坡地农田地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 10-14. (WANG Yanhua, QIU Xiankui, HU Guoqing, et al. Effect of controlled release fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland in slope field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 10-14. (in Chinese))
- [39] 朱成立, 张展羽. 灌溉模式对稻田氮磷损失及环境影响研究展望[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 56-58. (ZHU Chengli, ZHANG Zhanyu. Study on nitrogen and phosphorus in paddy field irrigation mode on the loss and environmental impact prediction [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(6): 56-58. (in Chinese))
- [40] ZHANG Ting, XU Dong, HE Feng, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010[J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 189-197.
- [41] WU Min, TANG Xianqiang, LI Qingyun, et al. Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, 224(5): 1-18.

(收稿日期: 2014-11-19 编辑: 彭桃英)