

我国不同区域小麦施肥资源环境影响的生命周期评价

李贞宇, 王旭, 高志岭, 马文奇

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘要:以河南、江苏和陕西三省的小麦生产体系为例,以生产 1 t 小麦为评价的功能单元,应用生命周期评价(LCA)方法,比较了不同生态区小麦施肥的资源环境影响潜力。结果表明,三省环境影响综合指数大小依次为江苏 0.288、河南 0.201、陕西 0.180。几种资源环境影响中,潜力大小依次是富营养化、环境酸化、温室效应、土地利用和能源消耗,其中施用氮肥引起的氨挥发是导致富营养化和酸化的主要因素。农户间生产的资源环境影响潜力差异很大,环境影响综合指数变异范围在 34.9%~57.3%,陕西最高,江苏最低。如果将小麦追肥由撒施都改为沟施,三省的环境影响综合指数将降低 28.0%~45.4%。

关键词:生命周期评价;资源消耗;环境排放;施肥方式;小麦

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1417-06

Life Cycle Assessment of Wheat Fertilization in Different Regions of China

LI Zhen-yu, WANG Xu, GAO Zhi-ling, MA Wen-qi

(College of Resources and Environment Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: Wheat is a key crop in China, consequently it is very important to assess the integrated environmental impacts of wheat production because it is associated with excessive fertilization. In this study, examples of Henan, Jiangsu and Shaanxi identified within different eco-districts were taken to evaluate the individual and integrated environmental indices using life cycle assessment(LCA) method. For simplicity, the individual and integrated environmental indices were estimated on the base of emissions, resource and energy consumptions to produce 1 ton wheat. Results showed that the integrated indices of these provinces were in an order of 0.288 (Jiangsu), 0.201 (Henan) and 0.180 (Shaanxi). Of the individual indices, they were in an order of eutrophication, acidification, global warming, land use and energy consumption, where eutrophication and acidification were mainly caused by ammonia volatilization during N fertilization. Large variation of environmental indices between farms of each province was recognized and the coefficient variances ranged from 34.9%~57.3%, in particular, Shaanxi and Jiangsu were with the highest and lowest environmental index respectively. Given the top-dressing of N fertilization were replaced with deep application, the integrated environmental indices would be reduced by 28.0%~45.4%.

Keywords: life cycle assessment; resource consumption; emissions; fertilization; wheat

小麦作为世界和我国最主要粮食作物之一,在粮食生产中具有举足轻重的作用。受“施肥越多产量越高”的观念影响,农民往往以高投入换取高产出,小麦过量施肥普遍存在,这不仅引起作物种植环节的资源消耗与污染排放,同时也带动了上游农资生产的资源消耗和环境污染。如何全面评价小麦施肥的资源环境

代价成为未来小麦可持续发展中必须解决的问题。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为一种新兴的环境管理工具,旨在对产品整个生命周期过程中的资源消耗和环境排放进行量化,寻求改善环境影响的机会^[1]。目前 LCA 已被纳入 ISO14000 环境管理体系,而且已经广泛应用于工业品的环境影响评价中,形成了一套较完整的方法体系^[2]。LCA 考虑了与生产体系相关的所有影响因子,评价结果比较全面,也便于找出环境影响的主导因子。国外不少学者把 LCA 方法引进农业领域,开展农产品或农田管理措施的 LCA 研究^[3-5],国内也有一些研究报道^[6-7],但仍然缺乏

收稿日期:2010-01-31

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB118608);农业部公益性行业专项(200803030)

作者简介:李贞宇(1982—),女,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为养分资源管理。E-mail:lizhenyu1982@126.com

通讯作者:马文奇 E-mail:mawq@hebau.edu.cn

区域比较和农户尺度的研究。为此,本研究以河南、江苏、陕西等主产省份小麦生产体系为对象,在农户调研和分析的基础上,构建小麦生产体系资源消耗和养分流动模型,进行施肥的资源环境影响评价,明确各区域小麦施肥的资源代价和环境效应,为制定引导农户科学合理施肥的政策提供指导,也为化肥产业政策的调整提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

小麦研究的样本取自河南、江苏、陕西等主产省份,分别分布在我国专业化生产和区域发展分区的华北区、华东区、晋陕区^[8]。三省小麦生产的数据分别来自对各省的 4 个县 12 个乡镇 192 个农户 2008 年投入产出的实地调查,抽样均采用随机等间距方法^[9]。小麦使用较多的化肥品种,有复合肥、尿素、碳酸氢铵、磷酸二铵和氯化钾,调查中均记载了其养分含量,各省养分投入和产量的统计结果见表 1。

表 1 2008 年三省小麦生产中肥料养分投入量与产量

Table 1 Fertilizer inputs and wheat yields of Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces in 2008

省份	N/ kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ / kg·hm ⁻²	K ₂ O/ kg·hm ⁻²	总养分/ kg·hm ⁻²	产量/ t·hm ⁻²	样本量
河南	167.1	66.1	38.6	271.7	6.89	176
江苏	204.7	30.5	29.1	264.2	5.35	176
陕西	143.4	37.7	15.2	196.3	6.06	168

1.2 评价方法

本研究根据国际环境毒理学和化学学会(SE-TAC)要求的 4 个阶段进行评价。通过对能源、原材料的消耗及“三废”的排放的鉴定及量化来评估一个产品生产过程或活动对环境带来负担的客观方法。1993 年 SETAC 把 LCA 描述成 4 个相互关联的组分组成的三角形模型。他们分别是目标定义和范围界定、清单分析、影响评价和改进评价^[10]。

1.2.1 目标定义与范围确定

以与小麦生产生命周期有关的矿石和能源开采为起始边界,作物种植环节输出的农产品和污染物为终止边界。以生产小麦籽粒 1 t 为评价的功能单元,测算不同区域每个调查农户生产 1 t 小麦施肥的资源消耗与环境排放。

1.2.2 清单分析

本研究中,原料环节主要考虑化肥生产所用原料开采的资源消耗与环境影响,其能耗等技术指标和

SO₂、CO₂、NO_x 等污染物排放系数来自国内相关研究报道^[11-12];作物种植阶段重点考虑田间肥料投入及其环境排放,其各种参数来自国内相关文献,其中氮肥有关参数见表 2。根据 2008 年对三省农户调查结果表明,不同区域基肥施用方式差别不大,追肥主要是撒施和沟施两种,但是不同区域撒施和沟施的比例差别很大。河南追肥沟施占 28%、陕西占 33%、江苏追肥全部为撒施。本研究中小麦撒施 NH₃ 挥发率采用氮素投入量的 21.00%^[13],沟施的氨挥发率采用氮素投入量的 8.00%^[14];径流淋溶损失的硝态氮撒施取氮素投入量的 15.70%^[15],沟施取 10.00%。其他参数来自 Velthof G L 等研究结果^[16]。土地占用数据根据生产每吨小麦占用的土地数量求得。相关的厂房设备、建筑设施、运输工具等生产的环境影响不予考虑^[7]。

表 2 小麦种植环节氮素排放、固定参数

Table 2 Factors of nitrogen emissions and fixations during wheat production

项目	氨挥发/ %	径流淋 溶/%	氧化 亚氮/%	沉降/ kg·hm ⁻²	氮氧化物/ kg·hm ⁻²	固氮系数/ kg·hm ⁻²
撒施排放	21.00	15.70	3.40	7.5	2	17
沟施排放	8.00	10.00	3.40	7.5	2	17

1.2.3 影响评价

生命周期影响评价主要是对识别出的环境影响进行定性或定量的表征评价,影响评价分为特征化、标准化和加权评估 3 个步骤。

1.2.3.1 特征化

特征化是对资源消耗和环境排放清单进行分类并计算环境影响潜力的过程。本研究仅考虑农产品生命周期的土地利用、能源耗竭、气候变化、环境酸化、富营养化 5 种环境影响类型。能源消耗以单位评价单元的能量消耗量表征,特征化参数 5.98;土地利用的特征化参数为 0.8^[18]。同类污染物通过当量系数转换为参照物的环境影响潜力。气候变化以 CO₂ 为参照物转换为全球变暖潜力(以 CO₂ 当量表示),N₂O 的当量系数 310^[19]。NO_x 和 NH₃ 同时具有环境酸化和富营养化潜力,环境酸化以 SO₂ 为参照物,NO_x 和 NH₃ 的当量系数分别为 0.7 和 1.88;富营养化以 PO₄³⁻ 为参照物,NO_x、NO₃⁻-N、NH₃、TN 和 TP 的当量系数分别为 0.13、0.42、0.33、0.42 和 3.06^[5]。

1.2.3.2 标准化

标准化过程是建立标准化基准,对土地利用、能源耗竭、气候变化、环境酸化、富营养化等各种环境影响类型的相对大小提供可比较的标准。本研究采用

2000 年世界人均环境影响潜力作为环境影响基准进行标准化处理^[17]。

1.2.3.3 加权评估

通过对各类环境影响指数进行综合,从而得到一个可比较的评价结果,这就需要确定各种环境影响类型的权重。本研究采用王明新等设置的权重系数^[8]。

1.2.4 改进评价

改进是识别、评价并选择能减少小麦生产系统整个生命周期内资源消耗与环境污染物释放的过程,如改进化肥生产工艺或改善农田管理措施等,本文选择改变小麦追肥方式进行评价。

1.3 数据处理

各省数据来自 2008 年的实地调研,为了保证数据的正确、可靠,对异常数据进行了剔除,从而筛选出客观有效的基础数据。本研究在确定了研究目标和研究范围的基础上对各省各农户小麦生产分别进行清单分析和影响评价。各区域的特征化、标准化以及加权来自该区域各农户的平均值。采用标准差作为衡量平均值代表性强弱和各环境影响类型和资源消耗的变异指标。

2 结果与分析

2.1 三省小麦施肥的资源消耗和环境排放

表 3、表 4 给出了三省小麦生产系统生命周期

资源消耗和环境排放清单。其中土地利用在 1 514~1 910 m²·t⁻¹,产量较高的河南小麦土地利用较优。磷矿消耗变幅在 23.24~39.14 kg·t⁻¹;钾矿消耗有明显的区域性变化,陕西最低为 14.60 kg·t⁻¹,河南的钾矿消耗最高达到 31.74 kg·t⁻¹,是陕西的 2.2 倍。能源消耗用标准煤表示,江苏最高达到 2 853 kgce·t⁻¹,河南和陕西省相对较低在 1 850 kgce·t⁻¹ 左右。N₂O、NH₃ 和 NO₃-N 主要通过小麦的种植环节排放,与氮肥的使用量和使用方式密切相关。其中 NH₃ 排放量大小依次为江苏省>河南省>陕西省。从来源看,SO₂、NO_x 和 CO₂ 的排放发生在原料环节和农资环节,P_{tot} 和 N_{tot} 的排放主要发生在种植环节和农资环节。

2.2 三省小麦施肥的资源环境影响评价

经特征化、标准化和加权评估后,河南、江苏和陕西三省小麦生命周期环境影响潜力大小依次是富营养化、环境酸化、温室效应、土地利用和能源消耗(图 1)。三省环境影响综合指数大小依次为江苏 0.288、河南 0.201、陕西 0.180。其中富营养化潜力在三省达到 80.9%~83.6%,环境酸化潜力达到 10.8%~13.7%。三省农户间环境影响综合指数变异范围在 34.9%~57.3%,陕西最高,江苏最低。

在最重要的富营养化和环境酸化中,各种因素的贡献见图 2 和图 3。三省小麦富营养化潜力大小依次为江苏、河南和陕西,其中陕西省富营养化潜力农户

表 3 三省小麦生命周期资源消耗清单
Table 3 Inventory of life cycle resources consumption during wheat production in Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces

地区	土地消耗/m ² ·t ⁻¹		磷矿消耗/kg·t ⁻¹		钾矿消耗/kg·t ⁻¹		能源消耗/kgce·t ⁻¹	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
河南	1 514	354.9	39.14	32.54	31.74	30.08	1 867	1 010
江苏	1 910	287.8	23.24	27.33	29.52	33.77	2 853	1 142
陕西	1 721	397.5	25.01	47.47	14.60	28.50	1 841	999.0

表 4 三省小麦生命周期排放清单(kg·t⁻¹)
Table 4 Inventory of life cycle emissions during wheat production in Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces(kg·t⁻¹)

项目	河南		江苏		陕西	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
N ₂ O	0.77	0.46	1.22	0.51	0.78	0.44
SO ₂	0.13	0.05	0.17	0.06	0.12	0.07
P _{tot}	0.27	0.21	0.18	0.17	0.19	0.30
NO _x	0.38	0.10	0.50	0.08	0.42	0.10
N _{tot}	0.68	0.28	0.90	0.34	0.62	0.34
NO ₃ -N	0.30	0.07	0.38	0.06	0.40	0.20
NH ₃	4.10	3.15	5.39	7.55	3.87	2.94
CO ₂	140.2	54.4	173.8	66.3	123.8	73.2

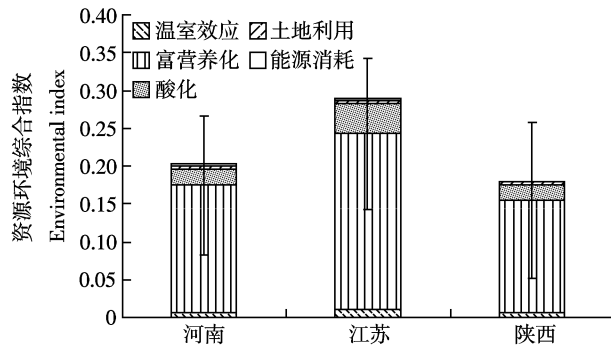


图1 三省小麦施肥的环境影响综合指数

Figure 1 Integrated environmental index of wheat production of Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces

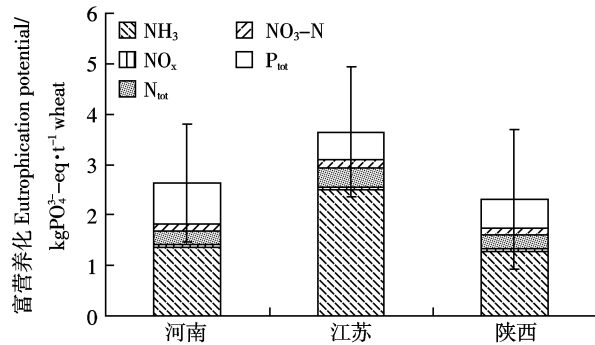


图2 三省小麦施肥的富营养化潜力

Figure 2 Eutrophication potential of wheat fertilization of Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces

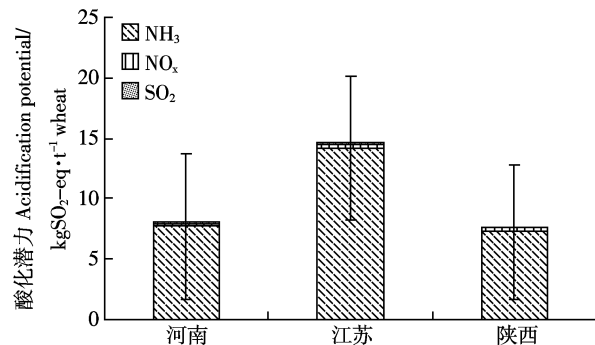


图3 三省小麦施肥的酸化潜力

Figure 3 Acidification potential of wheat fertilization of Henan, Jiangsu and Shaanxi provinces

间差异最大。从 NH_3 、 NO_x 、 N_{tot} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 P_{tot} 几种因素比较, NH_3 挥发贡献最大, 其贡献率陕西省最低达到 51.2%, 江苏省最高达到 68.2%; 其次是 P_{tot} 的排放, 河南、江苏和陕西省 P_{tot} 贡献率分别达到 31.2%、15.2% 和 24.7%。环境酸化潜力从大到小依次为江苏、河南和陕西, 其中河南省酸化潜力农户间差异最大。酸化主要贡献污染物是种植阶段的 NH_3 挥发, 贡献率均达到 94.0% 以上。

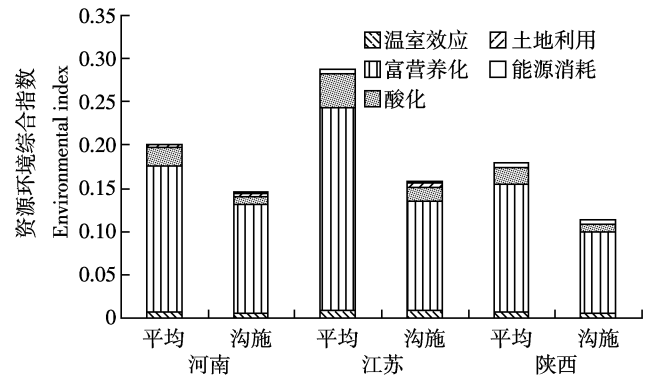


图4 三省不同施肥方式环境综合指数

Figure 4 Environmental index of LCA of wheat fertilization in three provinces by two top-dressing methods

2.3 改进施肥技术对降低资源环境影响的作用分析

如果将三省小麦生产系统都改成沟施, 结果见图 4。采用沟施后, 综合指数河南降低到 0.145, 江苏降低到 0.157, 陕西降低到 0.113。三省的酸化潜力降低了 53.2%~59.6%, 富营养化潜力降低了 25.7%~46.0%, 环境影响综合指数将降低 28.0%~45.4%。

3 讨论

施肥与环境一直是近年来人们关注的话题^[1,18]。20 世纪 80 年代以来, 我国农田面源污染问题加重, 很多地区地下水出现不同程度的硝酸盐污染, 包括苏浙沪地区、京津唐地区、西北关中平原地区, 尤其以华北地区污染最重^[19]。许多学者从化肥施用带来的温室效应^[20]、富营养化^[21]、环境酸化等方面分别研究了作物生产的资源环境代价, 阐明了各种影响效应并提出了降低环境风险的策略和技术。然而, 由于对整个农作物生产系统全面综合的资源环境评价还很少, 目前还不能区分这些环境影响的贡献, 也就难以确定降低环境影响的优先序。LCA 方法提供了这种可能, 从本研究三省小麦施肥的环境影响综合指数来看, 富营养化贡献率达到 80.9%~83.6%, 环境酸化贡献率达到 10.8~13.7%; 其中氨挥发又是引起富营养化和环境酸化的主要影响因素。表明目前小麦生产中如何降低氨挥发就是降低环境代价的核心, 而深施覆土就是非常有效的技术。本研究结果表明, 采用沟施的环境综合指数比撒施降低了 28.0%~45.4%。

目前, LCA 的研究对象和应用领域还是以工业生产和工业产品为主^[22]。农业生产是个更加复杂的系统, 能否采用 LCA 方法国内外进行了很多尝试。日本基于 LCA 方法, 开发总体上对环境正面影响最大化

的农业生产技术,从而建立面向可持续发展的农业生产系统。我国在这方面的研究已经起步,梁龙等应用 LCA 的方法分别对我国华北平原的冬小麦-夏玉米种植系统进行了评价^[6],王明新等对华北平原冬小麦采用不同施肥管理措施即常规施肥管理和推荐施肥管理两种管理措施进行小麦生产的生命周期评价,推荐施肥比常规施肥的环境影响综合指数降低了 49.2%^[7]。本研究从小麦生产最基本单位农户施肥的评价入手,基本阐明了不同生态区小麦施肥各个环节的资源环境效应,明确了主导因素和降低环境代价的关键技术。LCA 方法以单位籽粒产量产生的资源环境影响作为评价依据,理论上讲,产量与资源环境影响的关系应该是负相关关系,而从三省农户间的实际结果(图 5)看,农户间施肥的资源环境影响指数差异很

大,并且只有河南省随着小麦产量的增加农户施肥的资源环境综合指数呈现下降趋势;江苏省和陕西省基本无相关,说明目前施肥条件下,农民施肥不合理现象比较普遍,改进农户的施肥管理措施、降低资源环境综合指数有巨大潜力。

研究中发现,仍然存在一些因素限制 LCA 方法在农业上的应用。农户作为农业生产的基本单位,也应该是 LCA 的评价单位和控制资源环境影响的操作单位。本文结果证明了这一点,农户间资源环境影响差异巨大,急需分别进行评价和管理。但由于我国农户生产规模小,农户缺乏全面和准确的基础数据,给 LCA 分析带来了困难。目前还没有完全适合我国农业生命周期评价方法的数据和标准,应加强这方面的研究,可以在有条件的地区进行示范和试验,构建适合我国的农业 LCA 基础数据库,使生命周期评价方法在农业生产方面得到补充和完善。

4 结论

(1)三省环境影响综合指数大小依次为江苏 0.288、河南 0.201、陕西 0.180。

(2)各区域农户间的生产情况差异很大,三省农户间环境影响综合指数变异范围在 34.9%~57.3%,陕西最高,江苏最低。

(3)三省小麦生命周期资源环境影响潜力大小依次是富营养化、环境酸化、气候变化、土地利用和能源消耗。富营养化和酸化是小麦生产中的资源环境需要重点关注的问题。施用氮肥引起的氨挥发是导致富营养化和酸化的主要因素,通过改变管理措施可以有效降低其挥发量,从而降低环境影响综合指数。

参考文献:

- [1] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment Part1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environment International*, 2004, 30:701-720.
- [2] 杨建新. 面向产品的环境管理工具:产品生命周期评价[J]. *环境科学*, 1999, 20(1):100-103.
YANG Jian-xin. Toward a product orientated environmental management: Life cycle assessment[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(1): 100-103.
- [3] Charles R, Joliet O, Gaillard G, et al. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 113:216-225.
- [4] 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]. *Europ J*

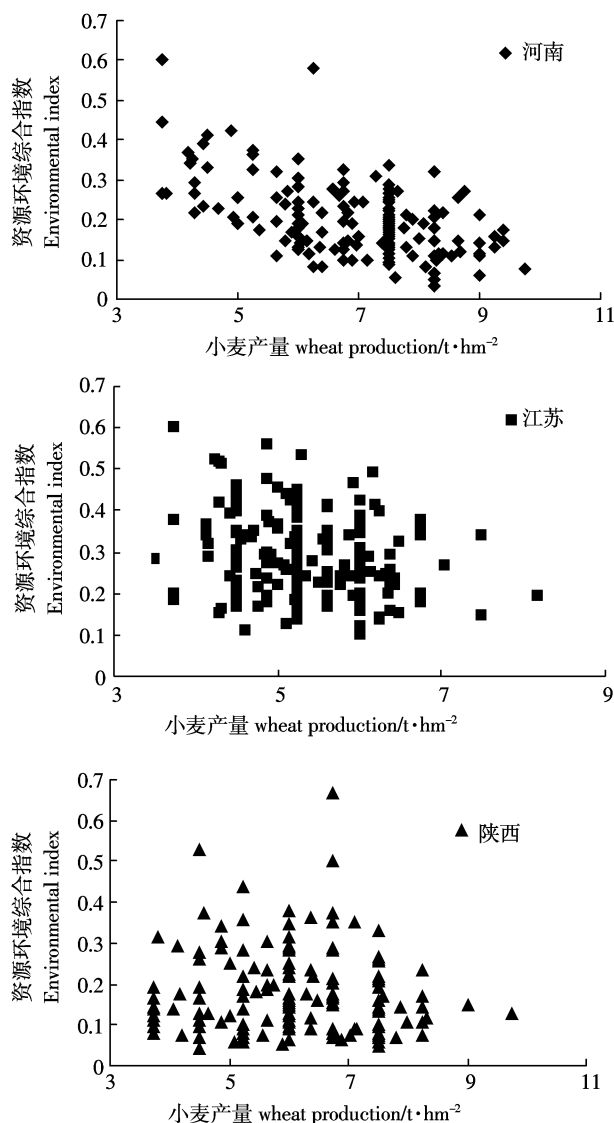


图5 三省小麦产量与资源环境综合指数的关系

Figure 5 Relation of wheat production and environmental index

- Agronomy*, 2001, 14:221-233.
- [5] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment(LCA) methodology. I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. *Europ J Agronomy*, 2004, 20:247-264.
- [6] 梁 龙, 陈源泉, 高旺盛, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(8):1773-1776.
- LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng, et al. Life cycle environmental impact assessment in wheat-summer maize system in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8):1773-1776.
- [7] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5):1127-1132.
- WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1127-1132.
- [8] 姜 洁, 安晓宁, 王义明, 等. 中国小麦生产区域比较优势的模型分析[J]. *农业现代化研究*, 1998, 19(1):9-12.
- JIANG Jie, AN Xiao-ning, WANG Yi-ming, et al. Modeling analysis of regional comparative dominance in maize production in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 1998, 19(1):9-12.
- [9] 金勇进, 蒋 妍, 李序颖. 抽样技术[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2002.
- JIN Yong-jin, JIANG Yan, LI Xu-ying. Sampling technique[M]. Beijing:China Renming University Press, 2002.
- [10] Consoli F, Allen D, Boustead I. Guidelines for life cycle assessment: A code of practice[M]. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1993:1-3.
- [11] 王 利. 中国化肥产业体系养分资源流动规律与管理策略研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008:43-46.
- WANG Li. Research on the nutrient flow and management strategies of chemical fertilizer industry system in China[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2008:43-46.
- [12] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5):632-635.
- DI Xiang-hua, NIE Zuo-ren, ZUO Tie-yong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5):632-635.
- [13] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. *华北农学报*, 2002, 17(1):76-81.
- LI Gui-tong, LI Bao-guo, CHEN De-li. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize[J]. *Acta Agronomica Boreali-Sinica*, 2002, 17(1):76-81.
- [14] 王 东, 于振文, 于文明, 等. 施氮水平对高产麦田土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9):1593-1598.
- WANG Dong, YU Zhen-wen, YU Wen-ming, et al. Effect a nitrogen application level on soil nitrate accumulation and ammonia volatilization in high-yielding wheat field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9):1593-1598.
- [15] 朱安宁, 张佳宝. 黄潮土的土壤水渗漏及硝态氮淋溶研究[J]. *农村生态环境*, 2003, 19(1):27-30.
- ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao. Soil water deep drainage nitrate leaching in fluvo-aquic soil[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(1):27-30.
- [16] Velthof G L, Oudendag D. Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE[J]. *Published in J Environ, Qual*, 2009, 38:402-417.
- [17] Huijbregts M A J, Breedveld L, Huppes G, et al. Normalization figures for environmental life-cycle assessment The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11:737-748.
- [18] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Life cycle impact assessment of land use based on the Hemeroby concept [J]. *Int J LCA*, 2002b, 7, 339-348.
- [19] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate change. 1995- the science of climate change[M]. UK: University Press, Cambridge, 1996.
- [20] 马文奇. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. *资源科学*, 2005, 5(3):33-38.
- MA Wen-qi. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. *Resources Science*, 2005, 5(3):33-38.
- [21] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤环境*, 2000, 9(1):1-6.
- ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.
- [22] 曹志洪. 施肥与大气环境质量——论施肥对环境的影响[J]. *土壤*, 2003, 35(4):265-270.
- CAO Zhi-hong. Effect of fertilization on air quality——Effect of fertilization on environment quality[J]. *Soils*, 2003, 35(4):265-270.
- [23] 张风华, 刘建玲, 廖文华. 农田磷的环境风险及评价研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4):797-805.
- ZHANG Feng-hua, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua. Environmental risk and assessment of agricultural phosphorus: A review[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4):797-805.
- [24] 杨印生, 盛国辉, 吕广宏. 我国开展农业 LCA 研究的对策建议[J]. *中国软科学*, 2003, 5:7-11.
- YANG Yin-sheng, SHENG Guo-hui, LV Guang-hong. Countermeasures on agricultural LCA research in China[J]. *China Soft Science*, 2003, 5:7-11.