

华北平原小麦-玉米农田生态系统服务评价*

肖 玉¹ 谢高地¹ 安 凯¹ 刘春兰² 陈操操²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 北京市环境保护科学研究院 北京 100037)

摘 要 本研究于 2006 年和 2007 年在中国科学院栾城农业生态系统试验站田间试验基础上, 评价了华北平原小麦-玉米农田的初级产品生产、气体调节、土壤有机质累积、水调节和氮素转化等 5 项生态系统服务。研究表明, 华北平原小麦-玉米农田初级产品量包括籽粒产量 $5.04\sim 5.71\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (小麦) 和 $6.69\sim 8.24\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (玉米), 秸秆量 $8.58\sim 9.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (小麦) 和 $6.97\sim 8.58\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (玉米); 农田气体调节包括释放 O_2 $24.99\sim 28.64\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 固定 CO_2 $34.23\sim 39.22\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 排放 N_2O $0.72\sim 1.13\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 吸收 CH_4 $3.39\sim 5.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 农田耕层土壤有机质累积量为 $1.13\sim 2.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 水资源消耗量为 $2\,890\sim 3\,830\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 农田土壤氮素几乎都处于亏缺状态, 变化范围为 $-107.73\sim 5.33\text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 不施氮肥农田亏缺较多。综合评价发现, 小麦-玉米农田提供生态服务的经济价值为 $5.48\sim 6.25\text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是粮食生产价值的 3 倍左右。氮肥施用对农田生态系统服务及其产生福利的影响较为复杂, 这主要是由于施加氮肥明显增加了氮素转化功能导致的经济损失, 而同时可能会增加初级产品生产、气体调节中作物固定 CO_2 和释放 O_2 功能的经济价值。尽管目前有关生态系统服务评价研究主要关注生态系统产生的正效应, 但仍有必要对农田产生的负效应做出评价, 以便客观看待农田生态系统价值, 正确认识农田生态系统对人类福利的影响。

关键词 农田生态系统 小麦-玉米农田 生态系统服务 正效应 负效应 华北平原

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)02-0429-07

Ecosystem services of wheat-maize cropland systems in the North China Plain

XIAO Yu¹, XIE Gao-Di¹, AN Kai¹, LIU Chun-Lan², CHEN Cao-Cao²

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract Field investigations were conducted at Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of Chinese Academy of Sciences in Hebei Province for the period from 2006 to 2007. The field data were then used to evaluate ecosystem services of wheat-maize croplands in the North China Plain. Ecosystem services analyzed in the study included primary products, gas regulation, soil organic matter (SOM) accumulation, water regulation and nitrogen transformation. The results showed that primary products from croplands accounted for $5.04\sim 5.71\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ of wheat grain, $6.69\sim 8.24\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ of maize grain, $8.58\sim 9.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ of wheat straw and $6.97\sim 8.58\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ of maize straw. As for cropland gas regulation, O_2 and N_2O emissions were $24.99\sim 28.64\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $0.72\sim 1.13\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, whereas CO_2 and CH_4 assimilations were $34.23\sim 39.22\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $3.39\sim 5.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. While cropland SOM accumulation was calculated at $1.13\sim 2.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, that of water consumption was $2\,890\sim 3\,830\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Soil nitrogen content dropped considerably at the rate of $-107.73\sim 5.33\text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ after one crop rotation. Total economic value of cropland ecosystem services was estimated at $5.48\times 10^4\sim 6.25\times 10^4\text{ Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, which was three times the value of food production. Based on the results, effects of nitrogen fertilizer on the welfare of cropland ecosystem services was complicated. Nitrogen application led to economic loss due to increasing nitrogen transformation, simultaneously, increased economic value of primary production, gas regulation, CO_2 fixation, and O_2 releasing. Most ecosystem services studies have focused on the positive effects of ecosystems on human welfare. But a balanced and reasonable approach was to analyze both the positive and negative effects of cropland ecosystem services on human welfare.

Key words Cropland ecosystem, Wheat-maize cropland, Ecosystem service, Positive effect, Negative effect, North China Plain

* 国家自然科学基金项目(30770410, 31070384)和中国科学院地理科学与资源研究所自主部署创新项目(200905010)资助

肖玉(1976~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为生态系统服务。E-mail: xiaoyu@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2010-10-20 接受日期: 2010-12-08

(Received Oct. 20, 2010; accepted Dec. 8, 2010)

农田生态系统是地球上重要的生态系统之一。随着全球生态环境的恶化,农田生态系统的功能已经从单纯的农业生产拓展为除农业生产外,还为当地和周边居民提供必不可少的生态服务,如气体调节、氮素转化、土壤有机质累积、水调节、环境净化、生物多样性维持、观光休闲、文化多样性保持等^[1-4]。有关农田生态系统服务经济价值评价的研究逐渐增加^[5-6],基于农田生态系统服务评价的农业政策探讨研究也开始出现^[7-10],有关农田生态系统造成的环境损害也开始被纳入农田生态系统服务评价过程中。Zhang 等^[11]认为,农田生态系统除为人类社会提供粮食和纤维、水供给、土壤保持以及美学景观等有益服务(Service)之外,还可能产生栖息地丧失、养分流失、物种丧失等负服务(Dis-service)。杨志新等^[12]在评价北京市郊农田对人类社会的影响时,将生态系统服务与生态系统及其过程产生的负效应分开评价,2002 年农田生态服务价值为 343 亿元,负效应价值为 1.57 亿元,并认为农田净服务价值应该由农田生态系统服务价值扣除农田负效应价值。农田生态系统服务经济价值的评价,将为农田利益相关者进行农田生态系统服务与其他产品或服务的比较,以及决策者进行不同农田相关政策权衡提供重要科学依据。而目前有关农田生态系统服务评价的研究大多还是基于宏观数据,难以为制定针对农田、农户或者村级的农业生态政策提供科学依据,不利于调动农民保护农田,改善农田生态系统服务的积极性。因此,本研究以河北省栾城县小麦-玉米农田生态系统为研究对象,通过田间试验和相关研究数据,综合评价农田生态系统服务物理量和价值量,在评估过程中同时考虑农田生态系统服务带来的经济效益以及农田对环境造成的损害,为全面、客观地认识农田生态系统服务对人类福利的价值提供科学依据。

1 研究区概况和试验设计

1.1 研究区概况

本研究田间试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(简称栾城试验站)进行,该站位于北纬 37°50',东经 114°40',海拔 50.1 m,属中国东部暖温带半湿润季风气候,年平均气温 12.3 °C,年降雨量 480.7 mm,主要集中于 6~8 月份,年蒸发量为 1 092.3 mm。试验小区土壤属潮褐土,pH 为 8.5,土壤有机质含量 7.4 g·kg⁻¹,总氮含量 0.80 g·kg⁻¹,黏粒含量 30.1%。

1.2 试验设计和测定

试验在栾城试验站养分池内进行,每个养分池面积 6.25 m²,用 2 m 深的水泥墙将每个池子与周围隔断,试验持续时间为 2005 年 10 月~2007 年 9 月,种植制度为小麦-玉米轮作。设 2 个氮肥水平(施氮量为 N1: 200 kg·hm⁻²·a⁻¹,N2: 400 kg·hm⁻²·a⁻¹),3 次重复。氮肥品种为尿素,小麦、玉米季各施肥一半,每年于小麦播种前施过磷酸钙,折合磷 49 kg·hm⁻²·a⁻¹。两个生长季的小麦品种为“科农 213”,玉米品种为“郑单 958”。常规田间管理。小麦均于第 1 年 10 月 6 日左右播种,第 2 年 6 月 12 日左右收获;玉米一般为 6 月 15 日左右播种,9 月 25 日左右收获。试验样品取样及分析方法如下:

(1)气体取样:采用静态箱法人工采集气体样品,利用惠普 5890 II 型气相色谱仪分析 N₂O 和 CH₄ 浓度。由于试验器材的限制,本试验主要测定了小麦整个生育期和玉米生长早期的温室气体排放通量。

(2)作物产量及其氮含量测定:在小麦和玉米成熟期测定试验小区产量。取小麦和玉米植株,运用凯氏法测定小麦茎叶和穗含氮量。

(3)用水量测定:每次灌水时记录用水量。

(4)土壤有机质测定:在每次作物收获后和种植前收集试验小区表层 20 cm 深度土壤样品,采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。

2 农田生态系统服务及其价值评价方法

2.1 初级产品生产

由试验测定结果直接获得,初级产品的价值由小麦和玉米的秸秆、籽粒重量乘以其市场价格得到。

2.2 气体调节

2.2.1 O₂ 和 CO₂ 调节

农田作物释放 O₂ 和固定 CO₂ 可通过光合作用方程由净生长量(M_{npp})生产换算得出。农田生态系统净释放 O₂ 和固定 CO₂ 的量还需要扣除土壤异养呼吸消耗的 O₂(Q_{so})和排放的 CO₂(Q_{sc})。O₂ 和 CO₂ 调节价值(V_r)计算公式为:

$$V_r = (\alpha \times M_{npp} - Q_s) \times p_r \quad (1)$$

式中, α 为净生长量换算为 O₂ 或 CO₂ 的系数,分别为 1.19 和 1.63; Q_s 为土壤异养呼吸消耗的 O₂ 或排放的 CO₂[kg(C)·hm⁻²·a⁻¹]; p_r 为释放 O₂ 或排放 CO₂ 的替代价格,O₂ 采用医用价格 1.00 元·kg⁻¹,CO₂ 采用瑞典碳税 1.20 元·kg⁻¹(C)^[13]。

2.2.2 CH₄ 和 N₂O 调节

小麦和玉米生长季内的温室气体排放量根据

IPCC^[14]提出的方法得出, 计算公式为:

$$E = F_m \times 24 \times n \times 0.01 \quad (2)$$

式中, E 为农田的 CH_4 或者 N_2O 排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), F_m 为气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), n 为生育期天数($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$)。

根据增温潜势(GWP)和瑞典碳税计算气体调节价值, 吸收温室气体价值为正, 释放为负。

$$E_C = 0.27 \times \beta \times E_n \quad (3)$$

$$V_C = c_g \times E_C \quad (4)$$

式中, E_C 为根据增温潜势将 CH_4 或者 N_2O 换算为纯碳的量($\text{kg}(\text{C}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); β 为 CH_4 或者 N_2O 换算为 CO_2 的 GWP 值(CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 24.5 和 320^[15]); E_n 为农田 CH_4 或者 N_2O 排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); V_C 为气体调节的价值($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); c_g 为吸收或排放 CO_2 的替代价格, 采用瑞典碳税 1.20 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{C})$ ^[13]。

2.3 土壤有机质累积

本研究根据 1 个轮作期内, 农田在小麦种植前和玉米收获后表层土壤有机质多年平均含量变化来计算。计算公式如下:

$$B_{soc} = (b_{ca} - b_{cb}) \times h \times \rho \times 0.58 \quad (5)$$

式中, B_{soc} 为土壤有机质累积量变化($\text{kg}(\text{C}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); b_{ca} 和 b_{cb} 分别为作物收获后和种植前的土壤有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); h 为土壤厚度(m), 试验区农田表层土壤厚度为 0.20 m(栾城试验站提供); ρ 为土壤容重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 试验区农田土壤容重为 1 500 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (栾城试验站提供); 0.58 为有机质换算为有机碳的系数。

土壤有机质积累的经济价值由土壤有机质累积量乘以纯碳量计量的有机质肥料的市场价格[1.47 元 $\cdot \text{kg}(\text{C})^{-1}$]获得。

2.4 氮素转化

本研究通过对农田氮素输入输出分析来研究氮素转化功能, 具体方法见表 1。

表 1 农田生态系统氮素转化价值分类

Tab. 1 Classification of economic values of the nitrogen transformations by the croplands

项目 Item	物理量计算方法 Method of calculation	价值 Value	价值评价方法 Method of valuation
输入 Input			
施肥 Fertilization	施加化学肥料中纯氮量 Pure N in fertilizer	正 Positive	替代市场价格法, 3.34 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
降水 Rainfall	作物生育期降水量 \times 降水中氮浓度($0.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ^[16]	正 Positive	(国家发改委价格司)
	Rainfall during growth period \times N concentration		Alternative market price method,
播种 Seeding	播种量 \times 种子氮素含量 Seeds \times N content	正 Positive	3.34 Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
灌溉 Irrigation	灌溉水量 \times 灌溉水氮浓度($3.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ^[16]	正 Positive	
	Irrigation water \times N concentration		
秸秆残留 Abandoned straw	秸秆残留量 \times 秸秆含氮量	正 Positive	
	Abandoned straw biomass \times N content		
输出 Output			
渗漏 Leaching	渗漏水量 \times 渗漏水氮浓度(采用李晓欣等 ^[17] 的结果)	负 Negative	边际消减成本法, 81.80 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$ ^[18]
	Leaching water \times N concentration		Marginal reduction cost method,
			81.80 Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
N_2O 排放 N_2O emission	同气体调节 Same as the method of gas regulation	负 Negative	瑞典碳税法, 1.20 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{C})$ ^[13]
			Sweden carbon tax method, 1.20 Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{C})$
氮挥发 NH_3 volatilization	施氮量 \times 氮挥发系数(15.1%) ^[16] N in fertilizer \times coefficient of NH_3 volatilization	负 Negative	边际消减成本法, 79.15 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$ ^[19]
			Marginal reduction cost method, 79.15
			Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
收获移出 Harvest	收获籽粒生物量 \times 籽粒含氮量 Seeds biomass \times N content	正 Positive	蛋白质边际价格法, 21.68 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
			(美国小麦协会, 2004 年)
			Marginal protein price method, 21.68
			Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$
			(United States Wheat Associates, 2004)
秸秆 Straw	收获秸秆生物量 \times 秸秆含氮量 Straw biomass \times N content	正 Positive	影子价格法, 3.34 元 $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$ (国家发改委价格司)
			Shadow price method, 3.34 Yuan $\cdot \text{kg}^{-1}(\text{N})$

2.5 水调节

小麦-玉米农田在生产过程中需要抽取地下水灌溉以补充作物所需水分, 同时一部分水通过渗漏进入地下水, 对当地水资源进行调节:

$$W_r = W_l - W_i \quad (6)$$

式中, W_r 为农田调节水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), W_l 为农田渗漏水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), W_i 为农田灌溉水用量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

水资源调节的经济价值由水资源调节量和该地区的水价($0.06 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$)^[20]计算得到。

3 结果与分析

3.1 初级产品生产评价

由表 2 可知, 2006 年和 2007 年试验小区两种施肥处理的小麦籽粒产量为 5.04~5.71 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 小麦秸秆量为 8.58~9.72 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。对不同施肥处理而言, 施氮量较多的 N_2 处理小麦产量及其秸秆量都高于 N_1 处理。2006 年和 2007 年试验地玉米籽粒产量为 6.69~8.24 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 玉米秸秆量略高于玉米产量。2007 年玉米产量和秸秆量都显著低于

2006 年, 可能是因为 2007 年玉米生长季降雨量显著少于 2006 年, 水分缺乏限制了作物生长。

3.2 气体调节评价

2006 年和 2007 年小麦-玉米农田净生长量为 $29.78 \sim 32.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 植物光合作用释放 O_2 量为 $35.43 \sim 39.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤异养呼吸消耗 O_2 为 $10.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1[21]}$ 。由表 3 可知, 2006 年和 2007 年农田 O_2 调节量为 $24.99 \sim 28.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。对于不同施肥处理而言, 2006 年施用氮肥较多的 N2 处理 O_2 调节量高于 N1 处理; 而 2007 年两处理 O_2 调节量相差不多。

2005~2007 年的两个轮作季, 试验小区小麦-玉米农田生态系统都固定大气中的 CO_2 , 表现为 CO_2 汇, 为 $34.23 \sim 39.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。研究结果还显示, 2006 年施氮量较高的 N2 处理 CO_2 调节量高于 N1 处理, 而 2007 年两个施肥处理 CO_2 调节量基本相当。黄斌等^[22]对北京小麦-玉米农田生态系统碳平衡研究发现, 常规种植措施下农田生态系统表现为大气 CO_2 的汇。曲奕威^[23]通过涡度相关法研究发现, 豫北平原小麦-玉米农田生态系统为 CO_2 汇, 其强度为 $16.02 \sim 21.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 低于本研究估算结果。

2006 年和 2007 年小麦-玉米农田生态系统在作物生长过程中向大气排放 N_2O , 排放量为 $0.72 \sim 1.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。对两种施氮处理而言, 2006 年和 2007 年施氮量较高的 N2 处理农田 N_2O 排放量都高于 N1 处理。这主要是由于化肥中的氮是农田 N_2O

排放的一个主要来源, 较多氮源供给的 N2 处理将排放更多的 N_2O 。曾江海等^[24]通过试验观测发现, 河北省栾城县小麦-玉米农田 N_2O 排放量为 $2.92 \sim 6.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于本研究观测结果。这可能是由于本研究受试验条件限制, 只观测了玉米生育早期的 N_2O 通量, 有可能造成玉米季 N_2O 通量的低估。

小麦-玉米农田生态系统在 2006 年和 2007 年的作物生长季节均为 CH_4 汇, 吸收量为 $3.39 \sim 5.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。研究结果还显示, 施加较多氮肥的 N2 处理 CH_4 吸收量低于施氮量较低的 N1 处理, 这主要是由于氮肥的施用抑制了土壤吸收 CH_4 ^[25]。齐玉春等^[26]采用静态箱法测定山东省禹城小麦-玉米农田 CH_4 通量, 结果显示农田为 CH_4 汇, 施肥条件下农田 CH_4 吸收量为 $3.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与本研究结果接近。

3.3 土壤有机质累积评价

根据栾城试验站养分池多年试验结果发现, 在第 2 年玉米收获后土壤有机质含量将比第 1 年小麦播种前有所增加。在 1 个轮作期内, N1 处理 0~20 cm 土层土壤有机质增加量为 $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 N2 处理增加 $0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 4)。表明在 1 个轮作期内, N1 处理 0~20 cm 土层土壤有机质累积量为 $2.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N2 处理为 $1.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。可见, 施加氮肥较多的 N2 处理土壤有机质累积低于 N1 处理, 这可能是由于施加氮肥可促进土壤微生物活性, 可更多地消耗土壤有机质。

表 2 小麦-玉米农田生态系统初级产品生产量
Tab. 2 Primary production by the wheat-maize cropland ecosystem $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

年份 Year	处理 Treatment	小麦 Wheat		玉米 Maize	
		籽粒产量 Grain yield	秸秆量 Straw	籽粒产量 Grain yield	秸秆量 Straw
2006	N1	5.04	8.58	7.92	8.24
	N2	5.65	9.63	8.24	8.58
2007	N1	5.55	9.44	6.93	7.22
	N2	5.71	9.72	6.69	6.97

表 3 小麦-玉米农田生态系统气体调节功能
Tab. 3 Gas regulation by the wheat-maize cropland ecosystem

年份 Year	处理 Treatment	O_2 释放 O_2 releasing ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	CO_2 吸收 CO_2 assimilation ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	N_2O 排放 N_2O emission ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	CH_4 吸收 CH_4 assimilation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
2006	N1	25.81	35.36	0.77	4.91
	N2	28.64	39.22	1.13	3.39
2007	N1	25.05	34.31	0.72	5.70
	N2	24.99	34.23	0.77	3.67

表 4 小麦-玉米农田生态系统土壤有机质累积评价
Tab. 4 Soil organic matter (SOM) accumulation by the wheat-maize cropland ecosystem

处理 Treatment	土壤有机质含量 SOM content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		土壤有机质累积量 SOM accumulation ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
	小麦播种前 Before wheat seeding	玉米收获后 After maize harvest	
N1	11.91	12.71	2.39
N2	12.40	12.78	1.13

3.4 水调节评价

2006 年和 2007 年试验小区灌溉用水量为 430 mm 和 360 mm。由于小麦和玉米的根系一般分布在 180 cm 土层以上, 180 cm 以下土层根系分布极少, 因此以土壤 180 cm 处作为土壤渗漏的界面。试验小区 180 cm 土层处渗漏量为 71 mm(N1)和 47 mm (N2)^[17]。因此, 该试验小区农田的水调节功能表现为消耗当地水资源, 2006 年水资源消耗量高于 3 500 m³ · hm⁻² · a⁻¹, 2007 年略低, 接近 3 000 m³ · hm⁻² · a⁻¹ (表 5)。由于试验地所处的华北平原是我国水资源较为缺乏的地区, 已经在试验地所在地区形成了地下水漏斗, 而且监测显示, 试验区地下水位已经持续下降多年。因此, 农业生产过程节约用水、提高水资源效率对当地社会经济发展非常重要。

3.5 氮素转化评价

2006 年和 2007 年 N1 处理农田氮素输入量接近 230kg(N) · hm⁻² · a⁻¹, N2 处理接近 430 kg(N) · hm⁻² · a⁻¹,

其中施肥是氮素输入的主要途径。2006 年和 2007 年 N1 农田氮素输出量较为接近, 为 330 kg(N) · hm⁻² · a⁻¹ 左右, 而 2006 年 N2 处理农田氮素输出为 460 kg(N) · hm⁻² · a⁻¹, 高于 2007 年, 这主要是 2006 年玉米收获移出氮素显著高于 2007 年(表 6)。农田氮素平衡状况分析发现, 2006 年两施肥处理下, 农田氮素输出量高于氮素输入量, 农田氮素出现亏缺; 2007 年 N1 处理农田氮素输出量高于输入量, 土壤氮素出现亏缺, 而 N2 处理农田氮素输入量高于输出量, 土壤氮素出现盈余。由此可见, 两施肥处理下, 在小麦-玉米轮作期内农田土壤氮素几乎都处于亏缺状态, 施肥较多的 N2 处理亏缺较少。试验小区土壤氮素含量在 1 个小麦-玉米轮作季前后的变化也表明, N1 农田土壤氮素含量可减少 0.042 g · kg⁻¹, N2 处理为 0.035 g · kg⁻¹, N2 处理土壤氮素含量减少略低(栾城试验站测定数据)。

表 5 小麦-玉米农田生态系统水调节评价

Tab. 5 Water regulation by the wheat-maize cropland ecosystem

年份 Year	处理 Treatment	灌溉用水 Irrigation (mm · a ⁻¹)	180 cm 土层处渗漏水量 ¹⁾ Soil leaching at 180 cm (mm · a ⁻¹)	水资源消耗量 Water consumption (m ³ · hm ⁻² · a ⁻¹)
2006	N1	430	71	3 590
	N2	430	47	3 830
2007	N1	360	71	2 890
	N2	360	47	3 130

1)数据引自李晓欣等^[16]于 2001~2002 年生长季的测定结果 Data was results of Li et al measured on the growth season of 2001~2002.

表 6 小麦-玉米农田生态系统氮素转化评价

Tab. 6 Nitrogen transformation of the wheat-maize cropland ecosystem

		2006		2007	
项目 Item		N1	N2	N1	N2
氮素输入 N input	施肥 Fertilization	200	400	200	400
	降水 Rainfall	3.62	3.62	2.87	2.87
	播种 Seeding	4.35	4.35	4.35	4.35
	灌溉 Irrigation	16.51	16.51	13.82	13.82
	残留秸秆 Abandoned straw	4.05	4.49	6.99	8.58
	小计 Sum	228.53	428.97	228.03	429.62
氮素输出 N output	小麦收获 Wheat harvest	132.60	159.79	145.93	161.30
	玉米收获 Maize harvest	170.69	201.67	149.42	163.82
	渗漏 Leaching	2.00	38.00	2.00	38.00
	N ₂ O 排放 N ₂ O emission	0.77	1.13	0.72	0.77
	氨挥发 NH ₃ volatilization	30.20	60.40	30.20	60.40
	小计 Sum	336.26	460.99	328.28	424.29
平衡状况 N balance		-107.73	-32.02	-100.25	5.33

3.6 小麦-玉米农田生态系统服务综合价值评价

研究结果显示(表 7), 小麦-玉米农田生态系统初级产品生产、气体调节和土壤有机质累积产生的经济价值都为正, 表明这些服务为人类福利产生了积极作用。在所有正价值中, 气体调节的经济价值高于其他各项。但是, 水调节和氮素转化经济价值

出现负值, 表明这两项服务将对人类福利造成损害。综合计算发现, 2006 年和 2007 年 N1 和 N2 两种施肥处理下, 小麦-玉米农田生态系统提供生态服务的经济价值为 5.48~6.25 万元 · hm⁻² · a⁻¹, 是粮食生产价值的 3 倍左右。不同年份施肥对农田生态系统服务综合价值的影响不同, 2006 年 N2 处理农田生

态服务综合价值略高于 N1 处理, 而 2007 年 N1 处理显著高于 N2 处理(表 7)。由此可见, 氮肥施用对农田生态系统服务及其产生福利的影响较为复杂, 这主要是由于施加氮肥明显增加了氮素转化功能导致的经济损失, 而同时可能会增加初级产品生产、气体调节中作物固定 CO₂ 和释放 O₂ 功能的经济价值。

表 7 小麦-玉米农田生态系统服务综合评价
Tab. 7 Integrated valuation of ecosystem services by the wheat-maize cropland system Yuan · hm⁻² · a⁻¹

项目 Item	2006		2007	
	N1	N2	N1	N2
初级产品生产 Primary production	19 679	21 210	19 267	19 233
气体调节 Gas regulation	37 346	41 384	36 256	36 141
土壤有机质累积 SOM accumulation	2 033	967	2 033	967
水调节 Water regulation	-215	-230	-173	-188
氮素转化 N transformation	2 977	-962	2 900	-1 424
综合价值 Integrated values ¹⁾	61 897	62 484	60 356	54 809

1)综合价值中已经扣除气体调节和氮素转化中重复计算 N₂O 排放的价值。N₂O 排放价值 2006 年为-78 元 · hm⁻² · a⁻¹ (N1)、-114 元 · hm⁻² · a⁻¹ (N2), 2007 年为-73 元 · hm⁻² · a⁻¹ (N1)、-79 元 · hm⁻² · a⁻¹ (N2)。In the integrated values of ecosystem services of the wheat-maize cropland ecosystem, the value of N₂O emission was just counted once, though it was calculated both in the gas regulation and the nitrogen transformation. N₂O emission value were -78 Yuan · hm⁻² · a⁻¹ (N1), -114 Yuan · hm⁻² · a⁻¹ (N2) in 2006 and -73 Yuan · hm⁻² · a⁻¹ (N1), -79 Yuan · hm⁻² · a⁻¹ (N2) in 2007.

4 结论与讨论

本研究在田间试验基础上评价了华北平原小麦-玉米农田生态系统的包括初级产品生产、气体调节、土壤有机质累积、水调节和氮素转化的生态系统服务。研究发现, 农田初级产品包括籽粒产量 5.04~5.71 t · hm⁻² · a⁻¹(小麦)和 6.69~8.24 t · hm⁻² · a⁻¹(玉米), 秸秆量 8.58~9.72 t · m⁻² · a⁻¹(小麦)和 6.97~8.58 t · hm⁻² · a⁻¹(玉米); 农田气体调节包括释放 O₂ 24.99~28.64 t · hm⁻² · a⁻¹, 固定 CO₂ 34.23~39.22 t · hm⁻² · a⁻¹, 排放 N₂O 0.72~1.13 kg · hm⁻² · a⁻¹, 吸收 CH₄ 3.39~5.70 kg · hm⁻² · a⁻¹; 农田耕层土壤有机质累积量为 1.13 t · hm⁻² · a⁻¹ 和 2.39 t · hm⁻² · a⁻¹; 水资源消耗量为 2 890~3 830 m³ · hm⁻² · a⁻¹; 农田土壤氮素几乎都处于亏缺状态, 变化范围为-107.73~5.33 kg(N) · hm⁻² · a⁻¹, 不施氮肥农田亏缺较多。2006 年和 2007 年 N1 和 N2 两种施肥处理下, 小麦-农田生态系统提供生态服务的经济价值为 6.00×10⁴ 元 · hm⁻² · a⁻¹ 左右, 是粮食生产价值的 3 倍左右。研究还发现, 氮肥施用对农田生态系统服务及其产生福利的影响较为复杂, 这主要是由于施加氮肥明显增加了氮素转化功能导致的经济损失, 而同时可能会增加初级产品生产、气体调节中作物固定 CO₂ 和释放 O₂ 功能的经济价值。

生态系统服务评价中价值的主体是人类社会, 评价生态系统服务的价值, 就是评价生态系统及其过程对人类社会产生的效用^[27]。生态系统及其过程不仅会提供对人类社会有益的效应, 还会产生一些损害人类社会福利的影响。在目前大量有关生态系统服务研究中, 大多只考虑生态系统产生的正效应,

即生态服务价值都为正值。实际上, 生态系统在提供这些正效应的生态服务过程中, 也伴随着一些负效应的产生, 例如森林、草地在植被生长过程中固定大气中的 CO₂, 同时土壤还向大气排放 N₂O。由此可见, 尽管现有研究中有关生态系统服务评价主要关注生态系统对人类社会产生的正效应, 但是农田产生的负效应也不能被忽略, 因为它们同样对人类社会产生深远的影响。全面评价农田生态系统服务, 是客观看待农田生态系统价值, 正确认识农田生态系统对人类福利影响的前提。

致谢 中国科学院栾城农业生态系统试验站为本试验提供基础数据和试验场地, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心的胡春胜研究员, 程一松、李晓欣副研究员以及河北师范大学资源与环境科学学院常春平博士、裴宏伟、王智超等在试验过程中给予帮助, 谨表谢意!

参考文献

[1] Swinton S M, Lupi F, Robertson G P, et al. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits[J]. Ecological Economics, 2007, 64: 245-252

[2] Food and Agriculture Organization (FAO). The state of food and agriculture 2002[R]. Rome: FAO, 2002

[3] Schlöpfer F, Hanley N. Do local landscape patterns affect the demand for landscape amenities protection?[J]. Journal of Agricultural Economics, 2003, 54(1): 21-34

[4] 谢花林. 乡村景观功能评价[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1988-1993

[5] Naylor R, Ehrlich P. The value of natural pest control services in agriculture[M]//Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington, D.C.: Island Press, 1997: 151-174

- [6] 肖玉, 谢高地. 上海市郊稻田生态系统服务综合评价[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 38-47
- [7] Pretty J, Ball A. Agricultural influences on carbon emissions and sequestration: A review of evidence and the emerging trading options[C]//Centre for Environment and Society Occasional Paper 2001-03. University of Essex. 2001
- [8] Ball A S, Pretty J N. Agricultural influences on carbon emissions and sequestration[C]. Proceedings of the UK Organic Research 2002 Conference. Wales, Aberystwyth: Organic Centre Wales, Institute of Rural Studies, University of Wales Aberystwyth, 2002: 247-250
- [9] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13
- [10] 陈源泉, 高旺盛. 基于农业生态服务价值的农业绿色 GDP 核算——以安塞县为例[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 250-259
- [11] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, et al. Ecosystem services and dis-services to agriculture[J]. Ecological Economics, 2007, 64(2): 253-260
- [12] 杨志新, 郑大玮, 冯圣东. 北京市农田生产的负外部效应价值评价[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 29-33
- [13] 中国生物多样性国情研究报告编写组. 中国生物多样性国情研究报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998
- [14] IPCC. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1992
- [15] Björklund J, Limburg K E, Rydberg T. Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: An example from Sweden[J]. Ecological Economics, 1999, 29(2): 269-291
- [16] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 5-11
- [17] 李晓欣, 胡春胜, 张玉铭, 等. 华北地区小麦-玉米种植制度下硝态氮淋失量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 7-9, 28
- [18] Berntsen J, Petersen B M, Jacobsen B H, et al. Evaluating nitrogen taxation scenarios using the dynamic whole farm simulation model FASSET[J]. Agricultural Systems, 2003, 76(3): 817-839
- [19] Turner R K, Georgiou S, Gren I M, et al. Managing nutrient fluxes and pollution in the Baltic: An interdisciplinary simulation study[J]. Ecological Economics, 1999, 30(2): 333-352
- [20] 国家计委价格司, 水利部经济调司. 百家大中型水管单位水价调研报告[J]. 中国水利学报, 2002(11): 2
- [21] 陈素英, 胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. 生态农业研究, 1997, 5(2): 42-46
- [22] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156-160
- [23] 曲奕威. 豫北平原冬小麦-夏玉米典型农田生态系统碳通量的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008
- [24] 曾江海, 王智平, 张玉铭, 等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算[J]. 环境科学, 1995, 16(1): 32-35, 67
- [25] Mosier A R, Schimel D S. Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide[J]. Chemistry and Industry, 1991, 23: 874-877
- [26] 齐玉春, 董云社, 章申. 华北平原典型农业区土壤甲烷通量研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(3): 56-58, 60
- [27] Costanza R. Social goals and the valuation of ecosystem services[J]. Ecosystems, 2000, 3(1): 4-10