

# 中国不同气候区温室农业生态系统服务价值比较 ——以华北区和长江中下游区为例

刘安钦<sup>1</sup>,王艳<sup>1</sup>,许彬<sup>2</sup>,杨武<sup>3</sup>,葛滢<sup>1</sup>,吴旭<sup>1</sup>,彭长辉<sup>4</sup>,常杰<sup>1,\*</sup>

(1. 浙江大学生命科学学院, 杭州 310058; 2. 浙江工商大学公共管理学院, 杭州 310018;

3. 密歇根州立大学鱼类和野生动物系系统综合与可持续发展研究中心, 东兰辛 MI 48823;

4. 魁北克大学蒙特利尔分校生物科学系环境科学研究所, 蒙特利尔 H3C 3P8)

**摘要:** 中国温室种植面积占世界的 85%。基于物质平衡方法, 选择中国主要温室农业区——华北区和长江中下游区, 估算了温室农业的生态系统服务及其经济价值。结果显示, 华北区和长江中下游区温室农业蔬菜年均产量分别比露天菜田高 74.05 和 30.95 t/hm<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> 固定量高 2.16 和 0.74 t/hm<sup>2</sup>, 保持土壤量高 13.86 和 11.41 t/hm<sup>2</sup>, 保护土壤养分量高 0.98 和 0.06 t/hm<sup>2</sup>。以 2004 年价格折算, 华北区和长江中下游区温室农业提供的生态系统服务价值分别为 68871 和 34064 元/hm<sup>2</sup>, 比当地露天菜田高 33946 和 5558 元/hm<sup>2</sup>; 环境成本分别为 10.41 和 27.08 元/hm<sup>2</sup>, 比当地露天菜田高 7.64 和 14.30 元/hm<sup>2</sup>。从成本收益角度分析, 无论是对农户还是全社会, 温室农业带来的净效益都高于露天菜田, 应该进行推广。

**关键词:** 经济价值; 成本收益分析; CO<sub>2</sub> 固定; 环境成本

## The comparison on economic values of ecosystem services for greenhouse agriculture of different climatic regions in China: two case studies from Northern China and the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

LIU Anqin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, YANG Wu<sup>3</sup>, GE Ying<sup>1</sup>, WU Xu<sup>1</sup>, PENG Changhui<sup>4</sup>, CHANG Jie<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

<sup>2</sup> Department of Public Administration, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

<sup>3</sup> Center for Systems Integration and Sustainability, Department of Fisheries and Wildlife, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

<sup>4</sup> Institut des sciences de l'environnement, D partement des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal, Case postale 8888, Succursale Centre-Ville, Montréal, QC, Canada, H3C 3P8

**Abstract:** Greenhouse cultivation area in China accounts for 85% of global total area. Based on the mass balance approach, we estimated ecosystem services of greenhouse agriculture for two cultivation regions of China (Northern China and the Middle and Lower Reaches of Yangtze River). Results show that, compared to open vegetable field, greenhouse agriculture demonstrates higher capacity in yield (30.95 to 74.05 t/hm<sup>2</sup>), CO<sub>2</sub> sequestration (0.74 to 2.16 t/hm<sup>2</sup>), soil retention (11.41 to 13.86 t/hm<sup>2</sup>), and soil nutrients protection (0.06 to 0.98 t/hm<sup>2</sup>). Based on 2004 prices, total economic values of ecosystem services of greenhouse agriculture in the two regions were 68871 and 34064 yuan/hm<sup>2</sup>, which were 33946 and 5558 yuan/hm<sup>2</sup> higher than that of open vegetable field, respectively. Although the environmental costs associated with greenhouse agriculture in the two regions were 7.64 and 14.30 yuan/hm<sup>2</sup> higher than that of open field vegetable field, it is worthwhile to promote greenhouse agriculture by producing higher net benefits for proprietary farmers and even the whole society.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30870235)

收稿日期: 2009-09-27; 修订日期: 2009-12-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jchang@zju.edu.cn

**Key Words:** economic value; cost-benefit analysis; carbon dioxide sequestration; environmental costs

农业系统在提供生态系统服务和保证人类福祉方面有重要作用。未来农业所面临的挑战是在保证全球食物供给的同时,减少对环境的影响,并提高其生态系统服务供给能力<sup>[1]</sup>。与传统农业相比,温室农业提供了更多的食物,还创造了更高的经济效益和更多的就业机会<sup>[2-3]</sup>。除直接价值外,温室农业还可以提供保护作物、节水等正面环境效益<sup>[4]</sup>,虽然会产生如土壤硝酸盐积累等负面环境影响。中国从20世纪70年代末引入温室,80年代后期就成为世界上温室农业面积最大的国家<sup>[5]</sup>,2006年已占世界总面积的85%<sup>[6-7]</sup>。然而面对如此快速扩张的温室农业,对其生态系统服务价值和环境成本却缺乏详细的了解,国际上的评估也很少。生态系统服务价值评估,对于正确理解生态系统功能,制定决策有重要意义<sup>[8]</sup>。本文选择我国温室农业主要产区——华北区(冬季寒冷,蔬菜季节性产量变化大)和长江中下游区(冬季相对温暖、蔬菜季节性产量变化较小)为研究案例,通过与同区域露天菜田的比较,评估并比较了两个气候区温室农业的生态系统服务价值和环境成本,旨在为正确促进温室农业发展提供理论依据。

## 1 研究区概况

中国的温室农业总面积在2006年已达250万 $\text{hm}^2$ <sup>[6]</sup>,其中约80%用来生产蔬菜<sup>[9]</sup>,主要为黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)、茄子(*Solanum melongena* L.)、甜椒(*Capsicum frutescens* L. var. *grossum* Bailey)<sup>[5]</sup>。

华北区是我国北方主要的温室农业产区,其面积约占全国的40%(表1),长江中下游区是我国南方的主要产区,其面积约占全国的17%(表1)。我国温室农业面积较大的省份(山东、河北、河南、江苏)<sup>[5]</sup>均位于上述区域内,因此这两个地区的温室农业可以作为中国温室农业的代表。

表1 中国主要温室农业区地理位置及气候条件

Table 1 Location and climatic style of chief greenhouse agricultural regions in China

项目 Items	华北区 Northern China	长江中下游区 The Middle and Lower Reaches of Yangtze River
温室面积 Greenhouse area/ $\text{hm}^2$	979000	427000
地理位置 Location	102°—124°E 41°—53°N	109°—122°E 28°—35°N
省份(直辖市)Province (municipality)	北京、天津、河北、河南、山东	上海、江苏、浙江、湖北、湖南、江西、安徽
年均温度 Annual mean temperature/ $^{\circ}\text{C}$	12.2 (7.1—14)	16.1 (14.9—17)
年均降雨量 Annual mean precipitation/mm	632.3 (456—764.7)	1112.7 (804.3—1200)

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

本文所使用数据来自野外实验和文献收集两方面。

(1)样地调查和采样测定 从研究区域内的每个省份(除湖南省和安徽省外)各选取1—3个具有规模效应的典型温室农业区作为样地,两个气候区共16个样地。从当地政府、农技站和农民中收集温室类型、施肥量、作物种类、翻耕次数等信息。每个样地随机选取5个样点,每个样点采用五点取样法采集温室和周边露天菜田0—20cm土样各1份,带回实验室后用重铬酸钾法测定土壤有机质含量。另外,每个样点随机选取5个1m×1m的样方,采集作物样品(包括收获部分和非收获部分),带回实验室测定含水率、收获系数,并用Fully Automatic Elemental Analyzer(vario EL III, Elementar, Germany)元素测定仪测定作物碳含量。土壤取样时间为2007年12月—2008年1月,作物取样时间为当地温室和露天蔬菜收获时间。

(2)文献数据收集 国内发表的年鉴(如中国农业年鉴、全国农产品成本收益资料汇编、中国物价年鉴等),政府报告和国内外文献。由于2004年价格数据比较齐全,所以本文用于经济价值计算的价格数据主要为2004年数据。

## 2.2 系统定义及边界

本文中温室指用于蔬菜生产的塑料拱棚和日光温室,不包括玻璃温室(其面积仅占中国温室总面积1%<sup>[5,9]</sup>)。塑料拱棚和日光温室的主要覆盖材料为塑料薄膜,栽培基质为土壤,构架结构主要为竹木和钢筋。温室系统的水平边界设定为温室(包括附属设施)的物理界面,如墙壁、棚膜和控制房;在垂直方向上,上边界为棚顶塑料薄膜或覆盖物,下边界为20 cm的土壤耕作层。

## 2.3 生态系统服务计算

根据千年生态系统评估组织的定义和分类标准<sup>[10-12]</sup>,建立了温室农业的生态系统服务价值体系(图1)。本文根据质量平衡原则,评估了4项主要的生态系统服务(产品供给、CO<sub>2</sub>固定、土壤保持、保护土壤养分),并应用市场价值法、影子价格法和机会成本法估算了各项服务的经济价值。

### 2.3.1 供给服务

根据研究区域内各省(直辖市)温室农业和露天菜田生产的主要蔬菜(以温室农业主产的4种蔬菜代表)的经济产量<sup>[13]</sup>分别计算其供给服务,并根据2004年上述蔬菜产生的平均收益<sup>[13]</sup>,计算供给服务的价值:

$$P_{pi} = \sum \frac{P_a \times A_j}{A_i} \quad (1)$$

$$V_{pi} = \sum \frac{V_a \times A_j}{A_i} \quad (2)$$

$$V_a = V_j - C_j \quad (3)$$

式中, $P_{pi}$ 为*i*区温室农业或露天菜田的供给服务( $t/(hm^2 \cdot a)$ ), $i(i=1,2)$ 分别代表华北区和长江中下游区, $P_a$ 为*j*省(直辖市)温室农业或露天菜田的经济产量(2004—2006年平均值)( $t/(hm^2 \cdot a)$ ), $A_j$ 为*j*省(直辖市)温室农业或露天菜田的面积( $hm^2$ ), $j$ 为不同省份(直辖市), $A_i$ 为*i*区温室农业或露天菜田的总面积( $hm^2$ ), $V_{pi}$ 为*i*区温室农业或露天菜田供给服务的经济价值(元/ $hm^2 \cdot a$ ), $V_a$ 为*j*省(直辖市)温室农业或露天菜田的净利润(元/ $hm^2 \cdot a$ ), $V_j$ 为总收入(元/ $hm^2 \cdot a$ ), $C_j$ 为总生产成本(元/ $hm^2 \cdot a$ ),即生产和销售过程中的所有成本,包括肥料等物质费用、人力费用、地租、固定资产折旧费用、销售费用、运输费用等<sup>[13]</sup>。

### 2.3.2 CO<sub>2</sub>固定

以不同省份(直辖市)温室农业和露天菜田的净初级生产力数据为基础,采用物质平衡法计算了两种种植系统的NEP:

$$NPP = \frac{P}{R} \times (1 - W) \times C \quad (4)$$

$$NEP = NPP - C_f + \Delta C_{soil} \quad (5)$$

式中, $NPP$ 为净初级生产力(考虑了复种)( $tC/(hm^2 \cdot a)$ ); $P$ 为不同蔬菜的经济产量(2004—2006年平均产量)<sup>[13]</sup>( $t/(hm^2 \cdot a)$ ); $R$ 为不同蔬菜的收获指数(实测数据); $W$ 为不同蔬菜的含水率(实测数据); $C$ 为不同蔬菜的含碳系数(实测数据); $NEP$ 为净生态系统生产力( $tC/(hm^2 \cdot a)$ ); $C_f$ 为肥料中碳含量( $tC/(hm^2 \cdot a)$ ),由施肥量和肥料中含碳系数<sup>[14]</sup>计算所得; $\Delta C_{soil}$ 为土壤碳密度年均变化量,计算方法如下:通过文献收集和土壤

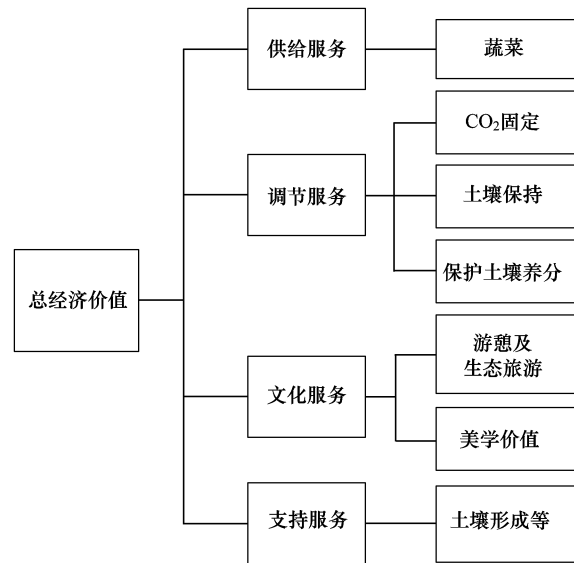


图1 温室农业的生态系统服务价值体系

Fig. 1 Economic value system for ecosystem services of greenhouse agriculture

样品测定获得各省(直辖市)温室农业0—20cm土壤有机碳密度随种植年限(0—20a)变化的动态数据,对上述动态数据进行线性回归分析,根据所得回归方程(华北区: $Y = 1.09X + 27.36$ ,  $n = 222$ ,  $R^2 = 0.029$ ,  $P < 0.05$ ; 长江中下游区: $Y = 0.35X + 28.82$ ,  $n = 81$ ,  $R^2 = 0.096$ ,  $P < 0.01$ )推算温室土壤碳密度的年均变化。由于缺乏露天菜田的动态数据,所以假设露天菜田土壤碳密度年均变化为0。

在具体  $NPP$  和  $NEP$  计算中,首先根据各省(直辖市)温室农业主要产品的经济产量、收获系数和含水率,计算各省(直辖市)温室农业和露天菜田的净初级生产力。然后根据两种种植系统施用肥料中的碳量,以及土壤中碳密度年均变化量,求得不同省市两种种植系统的  $NEP$ 。最后根据各省(直辖市)温室农业和露天菜田的面积,加权计算不同区域两种种植系统的  $NEP$ 。

根据上述  $NEP$  数据计算  $CO_2$  固定的价值 ( $V_{ci}$ , 元/( $hm^2 \cdot a$ )):

$$V_{ci} = F_{ci} \times P_c \quad (6)$$

式中,  $F_{ci}$  为  $i$  区温室农业或露天菜田的  $CO_2$  固定量 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ ), 根据  $NEP$  数据计算;  $P_c$  为固碳成本 (元/ $t$ ),  $P_c = 3.13/\text{€}O_2t$  ( $1\text{€} = 10.29$  元), 此价格为 2004 年中国在欧盟碳交易市场中的平均交易价格<sup>[15]</sup>。

### 2.3.3 土壤保持

将同地区农田作为对比,温室农业的土壤保持量 ( $S_t$ ,  $t/(hm^2 \cdot a)$ ) 可采用以下公式<sup>[16]</sup> 计算:

$$S_t = E_{pi} - E_{ri} \quad (7)$$

$$E_{ri} = E_{pi} \times c \times pr \quad (8)$$

式中,  $E_{pi}$  为  $i$  区温室农业潜在土壤侵蚀量 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ ), 以  $i$  区传统农田潜在土壤侵蚀量代替;  $E_{ri}$  为  $i$  区温室农业现实土壤侵蚀量 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ )。其中,  $c$  为地表植被覆盖因子,  $pr$  为土壤保持措施因子。根据 Wischmeier 和 Smith<sup>[17]</sup> 的研究,结合中国温室的结构特点,取  $c = 0.003$ ,  $pr = 0.04$ 。露天菜田的土壤保持量参考孙新章等的研究<sup>[16]</sup>。本文主要考虑降雨对土壤的侵蚀影响而未考虑风蚀影响,因为华北区风蚀面积仅占华北区总侵蚀面积的 8%,而长江中下游区风蚀面积为 0<sup>[18]</sup>。

根据因土壤流失而造成的废弃土地面积,采用机会成本法来计算土壤保持服务的经济价值<sup>[16, 19]</sup> ( $V_{si}$ , 元/( $hm^2 \cdot a$ ))。土壤保持价值计算公式:

$$V_{si} = \frac{S_t \times V_{pi}}{D \times \rho} \quad (9)$$

式中,  $D$  为中国农田平均厚度  $0.5 \text{ m}$ <sup>[16]</sup>,  $\rho$  为土壤容重<sup>[20]</sup> ( $t/m^3$ )。

### 2.3.4 保护土壤养分

土壤侵蚀导致大量土壤营养物质流失(主要为氮、磷、钾),因减少土壤流失而保持的土壤养分价值<sup>[16, 19]</sup> ( $V_{fi}$ , 元/( $hm^2 \cdot a$ ))可根据以下公式计算:

$$F_k = \sum_{k=1}^3 (S_t \times C_{ki} - F_i \times C_{fk} \times I_r) \quad (10)$$

$$V_{fi} = \sum_{k=1}^3 F_k \times P_k \times P_{ki} \quad (11)$$

式中,  $F_k$  为因减少土壤流失而保持的土壤营养物质 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ ),  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 分别代表氮、磷、钾,  $C_{ki}$  为  $i$  区温室农业或露天菜田土壤中氮、磷、钾的含量<sup>[20]</sup> (%)。在计算中,排除了施肥对土壤养分的影响,  $F_i$  为  $i$  区温室农业或露天菜田施肥量 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ ) (数据来自中国农业部<sup>[21]</sup> 及实地调查,包括化肥和有机肥);  $C_{fk}$  为肥料中氮、磷、钾的含量<sup>[22]</sup> (%);  $I_r$  为肥料在土壤中的残留率(排除作物利用部分、气态损失部分和地面径流损失部分后残留在土壤中的部分),这里温室农业和露天菜田分别取 45% 和 35%<sup>[23-24]</sup>;  $P_k$  氮、磷、钾折算成化肥(碳酸氢铵、过磷酸钙和氯化钾)的比例,分别是 79/14, 298/31 和 74.5/39;  $P_{ki}$  为  $i$  区氮、磷、钾的影子价格,为 2004 年研究区域内各省(直辖市)碳酸氢铵、过磷酸钙和氯化钾化肥的平均市场价格<sup>[25]</sup>。

### 2.4 环境成本

作为一种半自然半人工的生态系统,温室农业的生产过程和大量的外部投入也会对环境产生负面影响。

本文根据温室农业产生的负面环境影响,对其环境成本(以负值表示)进行了估算。

#### 2.4.1 农膜残留

农膜具有较高的稳定性,很难分解,并且其某些添加成分对作物有毒害作用<sup>[26-27]</sup>。残留在土壤中的农膜会破坏土壤的理化性状<sup>[27]</sup>,影响作物根系或幼苗生长而造成产量下降<sup>[26-27]</sup>。华北区温室大棚平均农膜残留量为  $6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[26]</sup>,长江中下游省市如安徽温室大棚平均农膜残留量为  $2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[27]</sup>。由于农膜对作物产量的影响最终反映在供给服务中,为了避免重复计算,本文不对塑料残留造成的产量下降进行估算。

#### 2.4.2 土壤硝酸盐积累

过量施肥和温室内高温等环境特点导致了土壤中硝酸盐积累<sup>[28]</sup>。积累在土壤中的硝酸盐一方面会造成土壤盐渍化,另一方面会影响蔬菜品质<sup>[29]</sup>。土壤中硝酸盐积累造成的环境损失可由以下公式计算:

$$VC_{N_i} = \sum \frac{Q_N \times C_N \times A_j}{A_i} \quad (12)$$

式中, $VC_{N_i}$ 为各区温室农业或露天菜田土壤硝酸盐积累造成的总环境成本(元/ $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), $Q_N$ 为各省(直辖市)温室农业或露天菜田土壤中硝酸盐量( $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )<sup>[29-36]</sup>, $C_N$ 为土壤硝酸盐积累造成的环境成本, $-56.5$ 元/ $\text{t}$ <sup>[24]</sup>。

#### 2.4.3 $\text{N}_2\text{O}$ 释放

$\text{N}_2\text{O}$  是农业生产中不可忽视的大气污染源之一,而过度施肥是其排放量增加的主要原因<sup>[37,38]</sup>。在中国,蔬菜种植系统排放的  $\text{N}_2\text{O}$  占全国耕作系统排放源的 20%<sup>[37-38]</sup>。释放  $\text{N}_2\text{O}$  造成的环境损失的计算公式为:

$$G_{N_2O} = FN_j \times E_i \quad (13)$$

$$VCM_{N_2O_i} = \sum \frac{G_{N_2O} \times C_{N_2O} \times A_j}{A_i} \quad (14)$$

式中, $VC_{N_2O_i}$ 为各区温室农业或露天菜田释放的  $\text{N}_2\text{O}$  造成的总环境成本(元/ $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), $G_{N_2O}$ 为  $\text{N}_2\text{O}$  释放量( $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ); $FN_j$ 为各省(直辖市)温室农业或露天菜田施用肥料中纯氮含量( $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )(根据施肥量数据计算); $E_i$ 为  $\text{N}_2\text{O}$  释放因子(占施用肥料纯氮含量的百分比),华北区为 3%<sup>[37]</sup>,长江中下游区为 7%<sup>[38]</sup>;  $C_{N_2O}$ 为氮氧化物的治理费用, $-0.63$ 元/ $\text{kg}$ <sup>[39]</sup>。

#### 2.4.4 农药对多样性影响

长期施用农药后,在有效防治病虫害的同时也影响了生态系统的生物多样性。然而,由于温室系统内生物多样性的研究还存在争论<sup>[28,40]</sup>,其价值评估还难以进行<sup>[41]</sup>,所以本文没有对大量施用农药造成的多样性影响进行评估。

### 3 结果

#### 3.1 环境影响比较

图 2 表明,温室农业提供的各项生态系统服务都高于露天菜田。与同地区露天菜田相比,华北区和长江中下游区温室农业每年产量分别高  $74.05$  和  $30.95 \text{ t}/\text{hm}^2$ , $\text{CO}_2$ 固定量分别高  $2.16$  和  $0.74 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,保持土壤量分别高  $13.86$  和  $11.41 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,保护土壤养分量分别高  $0.98 \text{ t}/\text{hm}^2$  和  $0.06 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。而在负面环境影响方面,研究区域内温室农业土壤中硝酸盐的积累量分别比同地区露天菜田高  $137.63$  和  $257.74 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , $\text{N}_2\text{O}$  释放量分别比同地区露天菜田少  $0.20$  和  $0.41 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

由图 2 还可以看出,华北区温室农业提供的各项生态系统服务都高于长江中下游区。其中,供给服务, $\text{CO}_2$ 固定服务,土壤保持服务,保护土壤养分服务分别高  $23.80$ 、 $2.53$ 、 $4.31$ 、 $1.85 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。而华北区土壤中硝酸盐积累量和  $\text{N}_2\text{O}$  释放量却分别为长江中下游区的 37% 和 64%。

#### 3.2 净效益比较

将上述各项服务以 2004 年价格货币化,华北区温室农业提供的生态系统服务的经济价值比露天菜田高  $3953$ 元/ $\text{hm}^2$ ,长江中下游区高  $5658$ 元/ $\text{hm}^2$ (表 2)。其中直接服务价值(供给服务经济价值)分别高  $30758$

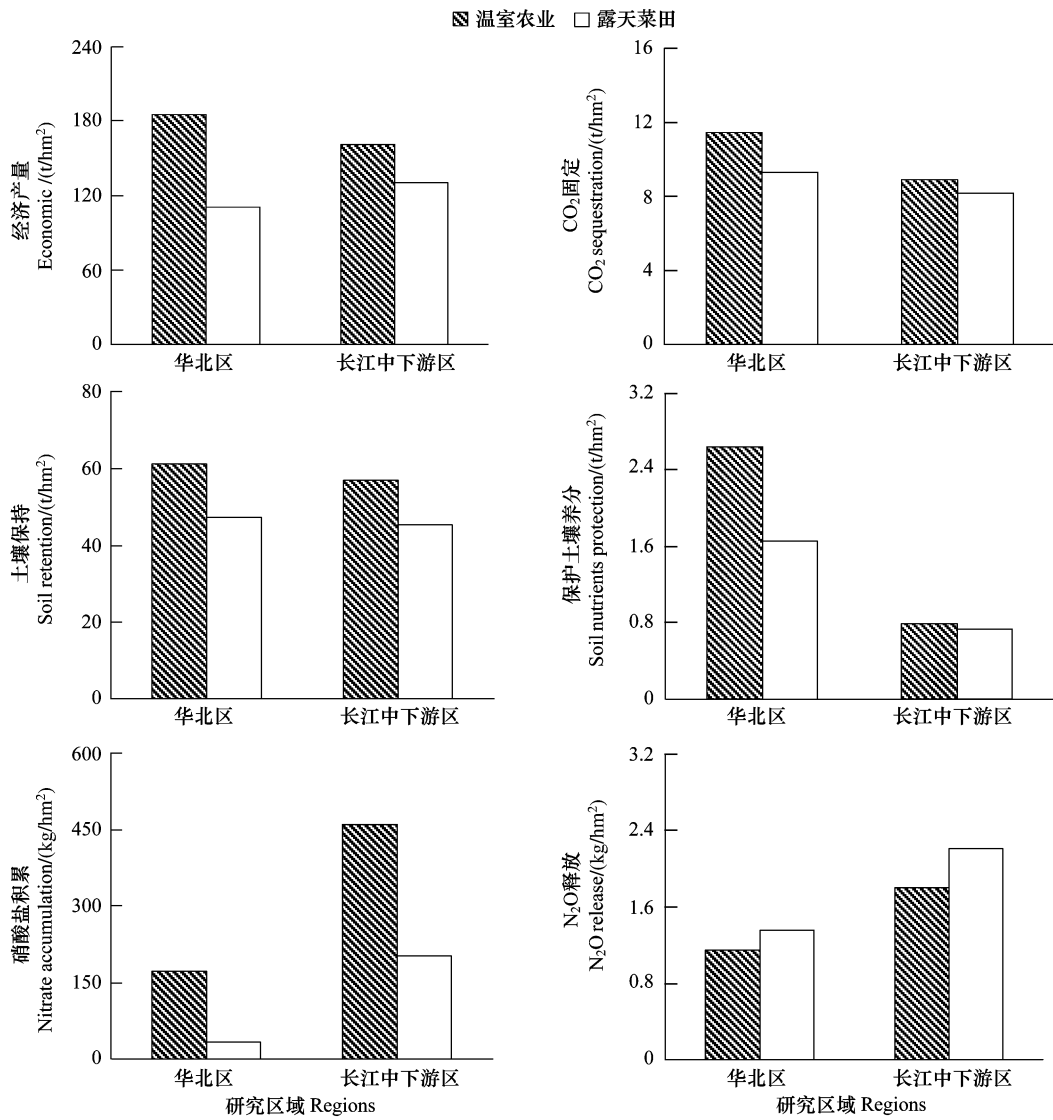


图2 温室农业和露天菜田的生态系统服务及负面环境影响

Fig. 2 Ecosystem services and negative environmental impacts provided by greenhouse agriculture and open vegetable field

表2 温室农业及露天菜田的生态系统服务的经济价值、环境成本和净效益/(元/(hm<sup>2</sup>·a))

项目 Items	华北区 Northern China		长江中下游区 The middle and lower reaches of Yangtze River	
	温室农业	露天菜田	温室农业	露天菜田
生态系统服务价值 Economic values of ecosystem services				
供给服务 Provisioning service	60654.21	29896.48	31424.14	25866.12
CO <sub>2</sub> 固定 CO <sub>2</sub> sequestration	369.85	299.23	287.28	263.47
土壤保持 Soil retention	585.18	223.06	296.52	228.43
保护土壤养分 Soil nutrients protection	7263.02	4499.26	2056.27	2048.24
环境成本 Environmental costs				
硝酸盐积累 Nitrate accumulation	-9.68	-1.91	-25.95	-11.39
N <sub>2</sub> O 释放 N <sub>2</sub> O release	-0.73	-0.86	-1.13	-1.39
净效益 Net benefits	68860.85	34915.27	34037.12	28393.49

和 5558 元/hm<sup>2</sup>, 间接服务价值(包括 CO<sub>2</sub> 固定、土壤保持和保护土壤养分的经济价值)分别高 3195 元/hm<sup>2</sup> 和 100 元/hm<sup>2</sup>。而温室农业造成的环境成本也高于露天菜田, 分别高 7.64 元/hm<sup>2</sup> 和 14.30 元/hm<sup>2</sup>。扣除环境成本后, 上述研究区域温室农业提供的净效益分别比当地露天菜田高 33946 元/hm<sup>2</sup> 和 5644 元/hm<sup>2</sup>。

由表 2 可看出, 华北区温室农业的净效益为长江中下游区的 2 倍。除 CO<sub>2</sub> 固定服务外, 华北区温室农业提供的各项生态系统服务的经济价值都明显高于长江中下游区(大于等于 2 倍), 而环境成本仅为长江中下游区的 38%(表 2)。

### 3.3 成本收益分析

成本收益分析作为决策者制定决策的工具之一, 在本文被用来分析温室农业发展的可行性。其中成本收益率 = 净利润(净效益)/总成本, 这里净利润为农产品带来的直接经济利润, 净效益为扣除环境成本后的生态系统服务价值。图 3 表明, 无论从直接经济利润角度还是净效益角度, 华北区种植温室农业获得的经济收益都大于露天菜田, 而长江中下游区仅略高于露天菜田。

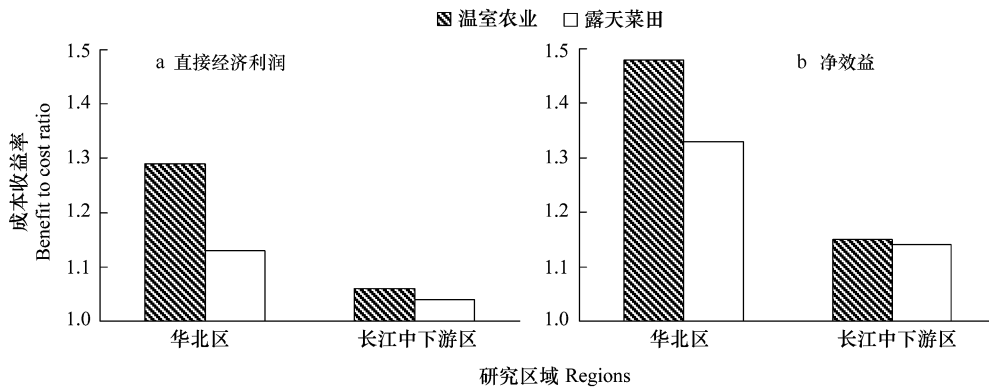


图 3 温室农业及露天菜田系统成本收益分析

Fig. 3 Cost-benefit analysis of greenhouse agriculture and open vegetable field

## 4 讨论

### 4.1 温室农业与露天菜田的价值权衡

在个体尺度上, 农户追求的是直接经济效益; 而从区域角度来讲, 国家应兼顾直接经济效益和间接环境效益。结果表明, 无论从个体尺度还是区域尺度上, 温室农业都能提供更高的净效益, 这在温室的快速发展中也得到了体现, 其主要原因可以从以下两点进行分析:

**温室的结构对其生态系统服务的影响** 温室创造了相对稳定的内部环境<sup>[3]</sup>, 不仅保证了作物的产量, 同时保护了内部的土壤系统(图 2)。首先, 温室的外部设施(墙壁和棚膜)可以减少外部环境和污染对作物影响<sup>[3]</sup>。稳定的内部环境延长了作物生长季<sup>[5]</sup>, 提高了产量。其次, 温室的附属设施(如覆盖物和墙壁)对地表的覆盖(>80%)可以减少雨水和风对地表的侵蚀。研究表明当农田地表无覆盖时, 水蚀和风蚀率都为 100%, 而农田土壤覆盖率达 >70% 时, 水蚀和风蚀分别为 <2% 和 <1%<sup>[42]</sup>。由此可推断在温室覆盖下土壤的侵蚀率应 <1%, 表层土壤可得到有效保护。此外, 华北区冬春季节地表覆盖不足的农田, 是该区域沙尘的一个来源<sup>[43]</sup>。温室增加了地表覆盖度, 降低了风蚀率, 因此可以作为减少沙尘暴的沙尘来源的措施之一。

**耕作措施对温室农业的生态系统服务的影响** 有机肥的使用、翻耕次数的减少可以增加土壤有机质含量<sup>[1,44-45]</sup>, 有助于土壤中碳的积累。据调查, 研究区域内的温室农业有机肥的施用量占肥料总量的约 80%, 绝大多数(约 80%)温室的翻耕次数不多于 2 次/a。计算结果也显示, 华北区和长江中下游区温室农业系统平均土壤碳积累量(1.09 tC/hm<sup>2</sup> 和 0.35 tC/hm<sup>2</sup>), 高于采用免耕措施的传统农田(0.26 tC/hm<sup>2</sup> 和 0.19 tC/hm<sup>2</sup>)<sup>[45]</sup>。另外, 减少表层土壤的流失也有效保护了土壤有机碳<sup>[44]</sup>。与露天菜田相比, 温室农业保持土壤增加量分别为 13.86 t/hm<sup>2</sup> 和 11.41 t/hm<sup>2</sup>(图 2), 相当于多保护了 0.04 t/hm<sup>2</sup> 和 0.03 t/hm<sup>2</sup> 的土壤有机碳(参照

Lu 等<sup>[45]</sup>的土壤有机碳计算方法)。综上所述,温室农业土壤碳含量的增加,以及作物生产力的提高都促进了生态系统固碳能力提高(图 2)。

虽然过量肥料的使用也导致了土壤中硝酸盐的积累和  $N_2O$  的释放(图 2)等负面环境影响,但与露天菜田相比,温室农业仍具有较高的净效益(表 2)。当然,上述负面环境问题不容忽视,合理的施肥及灌溉措施可以缓解这些问题<sup>[37-38]</sup>。

#### 4.2 不同气候区之间温室农业的生态系统服务价值比较及发展策略

与长江中下游区相比,华北区温室农业具有更高的生态系统服务价值和更低的环境成本,主要原因为以下两点:(1)华北区温室农业具有更高的供给服务价值,而供给服务价值占总服务价值的 90%(表 2)。由图 2 可看出,华北区温室农业的供给服务价值为本地区露天菜田的 200%,而在长江中下游地区仅为 120%。因为中国南北方气候差异明显,北方冬季气温低,蔬菜供应有限,因而反季节蔬菜的价格较高<sup>[9]</sup>。(2)华北区温室农业的施肥量要小于长江中下游区。据调查,华北区施肥量为  $40 \text{ t/hm}^2$ ,比长江中下游区低  $12 \text{ t/hm}^2$ 。过度的施肥不仅增加经营成本<sup>[5]</sup>,而且还增加了硝酸盐积累和  $N_2O$  释放的可能性<sup>[37-38]</sup>,产生额外的环境成本(表 2)。

鉴于华北区温室农业比露天菜田有明显的优势,建议当地政府通过提供补贴等手段支持温室农业的发展,但要改进施肥方式,减少负面环境影响。虽然与露天菜田相比,长江中下游区温室农业带来的净效益优势并不如华北区明显(图 3)。但是,在经济驱动力的影响下(每公顷可增收约 6000 元)(表 2),该区域仍有大量农户经营温室。当地政府和推广部门应该进行合理市场引导,普及科学管理方法,加强环境监测研究,正确指导该地区温室农业的发展。

#### 4.3 不确定性分析

本研究仍是不完全的保守估算,温室农业还可以提供节水<sup>[4]</sup>、减少酸雨和有害物质沉降对作物和土壤的危害<sup>[2]</sup>、观光旅游等服务。另外,温室农业还会对环境造成其他负面影响,如残留的化肥和农药对作物品质的影响,硝酸盐淋洗造成的地下水污染等<sup>[46]</sup>。

### 5 结论

与露天菜田相比,温室农业不仅可以给经营者提供高额的经济回报,还对全社会有更高的环境效益。在世界粮食危机、耕地日益减少、农业对环境的影响日益增加的情况下,温室农业是应对未来农业挑战的有效途径之一,应该进行推广。另外,加强温室农业区的环境监测,及时发现问题并提出改进措施是未来必需的工作。

#### References:

- [ 1 ] Tilman D, Cassman G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418: 617-677.
- [ 2 ] Jensen M H, Malter A J. Protected Agriculture: A Global Review. Washington, D. C.: The World Bank, 1995: 1-6.
- [ 3 ] Weinberger K, Lumpkin T A. Diversification into horticulture and poverty reduction: A research agenda. *World Development*, 2007, 35 (8): 1464-1480.
- [ 4 ] Stanghellini C, Kempkes F L K, Knies P. Enhancing environmental quality in agricultural systems. *Acta Horticulturae*, 2003, (609): 277-283.
- [ 5 ] Zou Z R. Facility Horticulture Science. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 3-11.
- [ 6 ] Yang Z C, Zou Z Y, Qu F M, Li J M. Horticulture industry development and specialists training. *Agricultural Engineering Technology (Greenhouse and Horticulture)*, 2007, (1): 15-17.
- [ 7 ] Zhang Y, Xu X H, Tian Z Y. Present status and problems of China's horticulture agriculture and its development trend. *Anhui Agriculture*, 2008, (12): 83-86.
- [ 8 ] Costanza R. Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, 2000, 3 (1): 4-10.
- [ 9 ] Costa J M, Heuvelink E. Protected cultivation rising in China. *Fruit and Vegetable Technology*, 2004, 4 (1): 8-11.
- [ 10 ] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 69 (3): 643-653.
- [ 11 ] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: A framework for assessment. World Resources Institute. Washington D. C.: Island Press, 2005: 50-60.



- [12] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, Carney K, Swinton S M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64 (2): 253-260.
- [13] State Development Planning Commission of China Price Department. *China Agricultural Cost and Benefit Data Compilation*. Beijing: China Statistics Press, 2005-2007.
- [14] Shen Q R. *Introduction of Soil and Fertilizer*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 274-283.
- [15] Hasselknippe H, Roine K. *Carbon 2006*. London: Point Carbon Publish, 2006: 1-7.
- [16] Sun X Z, Xie G D, Chen S K, Xiao Y, Lu C X. Services for soil conservation and its monetary value of Chinese cropping system. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19 (4): 156-159.
- [17] Wischmeier W H, Smith D D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, D. C.: Science and Education Administration, 1978: 31-38.
- [18] Peng K S. Challenge and countermeasures for sustainable development of China. *Science News*, 2008, (18): 34-36.
- [19] Xiao H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, Wang X K. Forest ecosystem services and their ecological valuation — A case study of tropical forest in Jiangfengling of Hainan island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (4): 481-484.
- [20] Institution of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing. *China Soil Database*. [2009-11-30]. <http://www.soil.csdb.cn/>.
- [21] Ministry of Agriculture of China. *Agricultural Yearbook of China*. Beijing: Agriculture Press, 2005: 166-167.
- [22] Xiao Y. *Agriculture Scientific Technology Handbook*. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1983: 40-65.
- [23] Cao W Z, Hong H S, Zhang Y Z, Chen N W, Zeng Y, Wang W P. Anthropogenic nitrogen sources and exports in a village-scale catchments in Southeast China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28 (2): 45-51.
- [24] Lai L, Huang X J, Wang H, Dong Y H, Xiao S S. Estimation of environmental costs of chemical fertilizer utilization in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (1): 63-69.
- [25] China Market Press Editorial Department. *Price Year Book of China*. Beijing: China Market Press, 2005: 423-428.
- [26] Du X M, Xu G, Xu D P, Zhao T K, Li F S. Mulch film residue contamination in typical areas of North China and countermeasures. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (S1): 225-227.
- [27] Huang G Q, Li W H. Environmental pollution of agriculture in mid-subtropical regions in China. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2006, 18 (5): 145-150.
- [28] Jiao K, Li D C. Changes in soil properties and environment in vegetable greenhouses. *Soils*, 2003, 35 (2): 94-97.
- [29] Yao C X, Chen Z L, Lu L M, Xu S Y, Fan B, Hou J. Nitric nitrogen content of soil and vegetable in Shanghai suburb. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19 (1): 84-88.
- [30] Li W Q, Zhang M, Li H F, Zan L S. The study of soil nitrate status in fields under plastic house gardening. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (2): 283-287.
- [31] Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, Zhang W L, Lin B. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use type in Beijing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37 (5): 692-698.
- [32] Liu J L, Liao W H, Gao Z L, Meng Z X. The status and impact factors of accumulating in cover vegetable field in Hebei Province. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 27 (1): 19-24.
- [33] Shi C Y, Zhang F D, Zhang J Q, He X S, Zhang J. Change of soil nutrients under greenhouses under long-term fertilization condition. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (4): 437-441.
- [34] Wang H, Dong Y H, An Q, Sun H X, Liu Q H, Liu Z Z. Nutrient accumulation in intensively vegetable soils in the southern suburb of Nanjing. *Soils*, 2006, 38 (1): 61-65.
- [35] Du L F, Zhang W L, Li Z H, Wu S X, Long H Y, Zhang R L. Soil quality with various planting patterns in Yangtze River Delta Area. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (1): 95-99.
- [36] Meng Y L, Wang Y P, Li J. Accumulation characteristics of salt in the protected vegetable field in southern Hebei Province. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2007, 35 (26): 8282-8283.
- [37] He F F, Jiang R F, Chen Q, Zhang F S, Su F. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China. *Environmental Pollution*, 2009, 157 (5): 1666-1672.
- [38] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, Zhu Z L, Butenhoff C. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China. *Atmospheric Environment*, 2006, 40 (12): 2225-2234.
- [39] National Development and Reform Commission of China, Ministry of Finance of China, Ministry of Environmental Protection of China, State Economic and Trade Commission of China. Measures for the administration of the charging rates for pollutant discharge fees. (2003-02-28) [2009-11-30]. [http://zfs.mep.gov.cn/gz/bmgz/qtgz/200302/t20030228\\_86250.htm](http://zfs.mep.gov.cn/gz/bmgz/qtgz/200302/t20030228_86250.htm).
- [40] Dong B, Zhang R Z, Jing S J, Xie Y, Yao H. Animal community structure in greenhouse soils with different planting years in Shouguang City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (8): 1769-1774.
- [41] Pretty J N, Brett C, Gee D, Hine R E, Mason C F, Morison J I L, Raven H, Rayment M D, van der Bijl G. An assessment of the total external

costs of UK agriculture. *Agricultural Systems*, 2000, 65 (2): 113-136.

- [42] Deumlich D, Funk R, Frielinghaus M, Schmidt W A, Nitzsche O. Basic of effective erosion control in German agriculture. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169 (3): 380-381.
- [43] Zhu S Y, Min Y H. Agroecological and economic approach of prevention and curing of sandstorms in China. *Ecological Economics*, 2004, 61 (1): 129-133.
- [44] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123 (1): 1-22.
- [45] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology*, 2009, 15 (2): 281-305.
- [46] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, Li J. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332 (4): 385-392.

#### 参考文献:

- [5] 邹志荣. 园艺设施学. 北京: 中国农业出版社, 2002: 3-11.
- [6] 杨振超, 邹志荣, 屈锋敏, 李建国. 设施园艺产业发展与人才培养. *农业工程技术(温室园艺)*, 2007, (1): 15-17.
- [7] 张英, 徐晓红, 田子玉. 我国设施农业的现状、问题及发展对策. *现代农业科技*, 2008, (12): 83-86.
- [13] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇. 北京: 中国统计出版社, 2005-2007.
- [14] 沈其荣. 土壤肥料学通论. 北京: 高等教育出版社, 2000: 274-283.
- [16] 孙新章, 谢高地, 成升魁, 肖玉, 鲁春霞. 中国农田生产系统土壤保持功能及其经济价值. *水土保持学报*, 2005, 19 (4): 156-159.
- [18] 彭珂珊. 我国可持续发展面临的压力与对策研究. *科学新闻*, 2008, (18): 34-36.
- [19] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. *应用生态学报*, 2000, 11 (4): 481-484.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库. [2009-11-30]. <http://www.soil.csdb.cn/>.
- [21] 中国农业部. 中国农业年鉴. 北京: 农业出版社, 2005: 166-167.
- [22] 晓岩. 农业科技常用数据手册. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983: 40-65.
- [24] 赖力, 黄贤金, 王辉, 董元华, 肖思思. 中国化肥施用的环境成本估算. *土壤学报*, 2009, 46 (1): 63-69.
- [25] 中国物价年鉴编辑部. 中国物价年鉴. 北京: 中国市场出版社, 2005: 423-428.
- [26] 杜小明, 徐刚, 许端平, 赵同科, 李发生. 中国北方典型地区农用地膜污染现状调查及其防治对策. *农业工程学报*, 2005, 21 (S1): 225-227.
- [27] 黄国勤, 李文华. 中国中亚热带地区的农业环境污染. *江西农业学报*, 2006, 18 (5): 145-150.
- [28] 焦坤, 李德成. 蔬菜大棚条件下土壤性质及环境条件的变化. *土壤*, 2003, 35 (2): 94-97.
- [29] 姚春霞, 陈振楼, 陆利民, 许世远, 范斌, 侯晶. 上海市郊菜地土壤和蔬菜硝酸盐含量状况. *水土保持学报*, 2005, 19 (1): 84-88.
- [30] 李文庆, 张民, 李海峰, 咎林生. 大棚土壤硝酸盐状况研究. *土壤学报*, 2002, 39 (2): 283-287.
- [31] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 张维理, 林葆. 北京市农田土壤硝态氮的分布于累积特征. *中国农业科学*, 2004, 37 (5): 692-698.
- [32] 刘建玲, 廖文华, 高志玲, 孟昭相. 河北省蔬菜保护地土壤养分的积累状况及影响因素. *河北农业大学学报*, 2004, 27 (1): 19-24.
- [33] 史春余, 张夫道, 张俊清, 何绪生, 张骏. 长期施肥条件下设施蔬菜地土壤养分变化研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9 (4): 437-441.
- [34] 王辉, 董元华, 安琼, 孙红霞, 刘庆淮, 刘正柱. 高度集约化利用下蔬菜地土壤养分累积状况——以南京市南郊为例. *土壤*, 2006, 38 (1): 61-65.
- [35] 杜连凤, 张维理, 李志宏, 武淑霞, 龙怀玉, 张认连. 长江三角洲地区不同种植类型对土壤质量的影响. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (1): 95-99.
- [36] 孟艳玲, 王丽萍, 李季. 冀南地区蔬菜保护地土壤盐分积累特征. *安徽农业科学*, 2007, 35 (26): 8282-8283.
- [39] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国财政部, 中华人民共和国国家环境保护总局, 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 《排污费征收标准管理方法》. (2003-02-28) [2009-11-30]. [http://zfs.mep.gov.cn/gz/bmgz/qtgz/200302/t20030228\\_86250.htm](http://zfs.mep.gov.cn/gz/bmgz/qtgz/200302/t20030228_86250.htm).
- [40] 董博, 张仁陟, 荆世杰, 谢永, 姚骅. 寿光市不同棚龄温室土壤动物群落结构. *应用生态学报*, 2008, 19 (8): 1769-1774.