

DOI: 10.5846/stxb201809272092

刘静萍, 徐昔保. 不同管理模式对农田生态系统服务的影响模拟研究——以太湖流域为例. 生态学报, 2019, 39(24): 9314-9324.

Liu J P, Xu X B. Simulating the effects of different management modes on the ecosystem services of agroecosystems: a case study of the Taihu Lake Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9314-9324.

## 不同管理模式对农田生态系统服务的影响模拟研究 ——以太湖流域为例

刘静萍<sup>1,2</sup>, 徐昔保<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 高强度的农业生产给生态环境带来诸多负面影响, 如何权衡农田生态系统服务是农业可持续发展面临的重要问题之一。本文以太湖流域稻麦轮作农田生态系统为研究对象, 利用基于 0—10cm 土壤温度、10—20cm 土壤温度、水稻生物量和小麦生物量等为目标函数的 PEST 软件校准 APSIM 模型, 遴选三类重要生态系统服务——粮食供给(粮食产量)、水质调节(氮流失)和气候调节(N<sub>2</sub>O 排放、固碳-土壤有机碳), 针对不同秸秆还田(无秸秆还田、稻秆还田麦秆不还田、麦秆还田稻秆不还田、稻麦秆全还田)和施肥模式(0、-5%、-10%、-20%)等设定 16 种情景模拟 1986—2015 年太湖流域生态系统服务变化趋势, 利用自组织映射法(SOM)分析其权衡协同关系变化, 以为农田生态系统管理提供科学依据。结果表明: (1) 相对秸秆还田, 粮食产量、N<sub>2</sub>O 排放、氮流失和土壤有机碳受施肥影响更为显著, 均随施肥量减少而下降; (2) 不同管理模式对固碳影响较弱, 对 N<sub>2</sub>O 排放和水质调节影响明显, 稻麦秆全还田且减量施肥 5%、10% 或 20% 情景对 N<sub>2</sub>O 排放抑制最为有效, 减排量均超过 30%, 氮流失量减量大于 7%; (3) 粮食供给与固碳、N<sub>2</sub>O 排放均存在显著的协同关系, 粮食供给与水质调节、固碳与水质调节、水质调节与 N<sub>2</sub>O 排放呈显著权衡关系, 固碳与 N<sub>2</sub>O 排放呈弱权衡关系; (4) 基于 N<sub>2</sub>O 排放量和氮流失量均低于基准模拟且粮食单位产量减少低于 5% 的情景下, 无秸秆还田且减量施肥 5% (SO\_F1) 和稻麦秆全还田且减量施肥 5% (S3\_F1) 两种模式相对有利于整体提升太湖流域农田生态系统服务。此外, APSIM 模型有待更多的野外监测数据进一步校准改进以提高模型率定精度, 同时需扩展不同模式影响下太湖流域农田生态系统服务综合效应评估, 以获取更加科学、合理的优化模式与途径。

**关键词:** 农田生态系统服务; 权衡与协同; APSIM 模型; 太湖流域

## Simulating the effects of different management modes on the ecosystem services of agroecosystems: a case study of the Taihu Lake Basin, China

LIU Jingping<sup>1,2</sup>, XU Xibao<sup>1,\*</sup>

1 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Ecosystem services (ES) of rice-wheat rotation agroecosystems play an important role in global ecosystem services. Some ES are facing large-scale degradation owing to changes in land use and agriculture management modes in the Taihu Lake Basin. This has resulted in an increasing awareness of sustainable agricultural development through optimizing and advancing ES of the agroecosystems. This study simulated the trends and trade-offs of agroecosystem ES in the Taihu Lake Basin from 1986 to 2015 using the APSIM model. The APSIM model was calibrated by PEST software, with observations on grain supply (grain field), climate regulations (N<sub>2</sub>O emissions, carbon sequestration-soil organic carbon), and water quality regulations (N-losses). Recently, high utilization of chemical fertilizers and low-use efficiency of straw

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771571); 所前言探索与基础性研究(NIGLAS2016QY02)

收稿日期: 2018-09-27; 网络出版日期: 2019-09-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbxu@niglas.ac.cn

has led to many severe issues in the Taihu Lake Basin, such as agricultural non-point source pollution. Based on the combinations of differential straw-returns (non-straw returning, rice straw-returning and non-wheat straw-returning, wheat straw-returning and non-rice straw-returning, all straw-returning) and different fertilizer use (0, -5%, -10%, -20%), this study designed 16 scenarios to simulate and assess three key ES in the Taihu Lake Basin. The trade-offs were assessed by using a self-organizing map (SOM) to derive effective management measures to improve overall agroecosystem ES. The results show that: (1) grain yield,  $N_2O$  emissions, N losses, and soil organic carbon are more significantly affected by fertilizer use than are straw-returns, and the former are characterized by declines with reduced fertilizer utilization; (2) Different management modes have a weak impact on carbon sequestration, but significant effects on  $N_2O$  emissions and water quality regulation. All straw-returning and 5%, 10%, or 20% reductions of fertilizer utilization are more effective in suppressing  $N_2O$  emissions, and the reduction of N losses is greater than 7%. (3) There exists a strong synergistic relationship between grain supply and both carbon sequestration and  $N_2O$  emissions, respectively. Grain supply and water quality regulation, carbon sequestration and water quality regulation, and water quality regulation and  $N_2O$  emissions present significant trade-offs, respectively. Carbon sequestration and  $N_2O$  emissions show a weak trade-off. (4) Assuming water quality regulation (N losses) and climate regulations ( $N_2O$  emissions) are lower than those of the basic scenario and the reduction in grain yield is less than 5%, two scenarios-non-straw returning and 5% fertilizer reduction (S0\_F1), and all straw-returning and 5% fertilizer reduction (S3\_F1)-can help to advance overall agroecosystem services in the Taihu Lake Basin. It is necessary to improve calibration of the APSIM model because of the relatively low soil organic carbon. Additionally, the comprehensive effects of different modes on agroecosystem ES in the Taihu Lake Basin need to be further explored.

**Key Words:** agroecosystem services; trade-off and synergy; APSIM model; Taihu Lake Basin

农田生态系统提供了粮食供给、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、生物多样性保护和娱乐文化等生态系统服务,是全球最重要的生态系统之一<sup>[1]</sup>。高强度的农业生产也给生态环境带来诸多负面影响,过多化肥施用导致过量的面源污染排放,进而加剧地表水体富营养化风险<sup>[2]</sup>,同时稻田也是大气  $CH_4$  和  $N_2O$  重要排放源之一<sup>[3]</sup>。2016年,国土资源部公布中国耕地总面积占国土面积的 19.6%,其中中低产田占耕地面积的 67%<sup>[4]</sup>;全国第一次污染源调查显示,来自农田面源污染的总氮、总磷分别占对应总排放量的 57.2% 和 67.4%<sup>[5]</sup>,太湖流域农田面源污染占其河流总负荷量的 70%<sup>[6]</sup>,化肥过度使用是农业面源污染的主要来源<sup>[7]</sup>。据研究表明,全球农田生态系统固碳潜力为 0.4—0.9PgC/a,但我国仅为 182.1TgC/a,地处太湖流域的江苏省、上海市和浙江省分别为 0.005TgC/a、0.0001TgC/a 和 0.003TgC/a<sup>[8]</sup>。面对农田生态系统提供的多项生态系统服务及其环境负面效应,如何权衡与优化农田生态系统服务是农业可持续发展面临的重要问题之一。

关于农田生态系统服务,早期国内外学者主要利用价值评估法对农田生态系统中的供给服务、调节服务、支持服务和文化服务进行简单的货币化评估<sup>[9]</sup>,由于价值量评估法存在的缺陷与局限性,学者引用野外调查<sup>[8]</sup>、影子工程法<sup>[10]</sup>、机会成本法<sup>[10]</sup>等方法深入探讨单项农田生态系统服务<sup>[8]</sup>和农田生态系统多功能服务<sup>[10]</sup>。人类对生态系统服务的选择偏好加剧了生态系统服务间的冲突,如何有效管理生态系统服务间的权衡协同关系已成为学界研究热点。国内外学者对农田生态系统服务权衡与协同关系的研究相对较少,主要集中在农田生态系统服务权衡和协同关系辨识<sup>[11]</sup>、表现形式<sup>[12-13]</sup>、驱动机制<sup>[14]</sup>等方面进行了模拟分析,主要以空间制图<sup>[15]</sup>、情景分析<sup>[12]</sup>、模型模拟<sup>[16]</sup>等研究方法为主。现有研究中缺乏辨识权衡与协同关系和驱动力影响后进一步在具体的农田生态系统服务管理与应用方面的运用,以此突出农田生态系统服务权衡与协同关系在实际应用中的作用。而当前所运用的研究方法以定性分析为主,定量分析较少,而应用较多的模型(如 InVEST 模型)虽因简便且数据易获取,但模型结构较为简化,模型参数缺乏率定与验证,导致模拟结果存在较大的不确定性<sup>[16]</sup>。

太湖流域是我国农业发展最发达的地区之一,1985—2010年流域耕地面积减少 5847km<sup>2</sup>(25%),2020年

预计再减少 10.5%, 农田生态系统多种生态服务(水质净化、固碳、粮食供给)均呈较显著的退化趋势<sup>[17]</sup>, 已影响太湖流域水安全和生态安全。近年来, 学者主要从固碳<sup>[8]</sup>、粮食供给<sup>[18]</sup>等单项生态系统服务角度讨论太湖流域生态系统服务及存在的问题, 较少涉及综合农田生态系统服务及其权衡协同关系研究。理解和掌握太湖流域农田生态系统服务权衡与协同关系, 有利于优化与提升整体生态系统服务与农业可持续发展。鉴于此, 本研究选取粮食供给、水质调节和气候调节三类关键生态系统服务, 其中粮食产量和氮流失量分别作为粮食供给、水质调节的表征指标, 固碳(土壤有机碳)和 $N_2O$ 排放表征气候调节服务; 利用 APSIM 模型(Agricultural Production System Simulator)模拟不同秸秆还田和施肥模式下太湖流域农田生态系统多种生态系统服务变化趋势, 利用自组织映射法分析其权衡协同关系变化, 以为太湖流域农田生态系统管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

太湖流域地处长江三角洲, 北抵长江, 东临东海, 南滨钱塘江, 西以天目山、茅山为界, 介于  $119^{\circ}3'1''E$ — $121^{\circ}54'26''E$ 、 $30^{\circ}7'19''N$ — $32^{\circ}14'56''N$ , 是我国农业最发达的地区之一, 为典型的稻麦轮作区。位于中纬度地区的太湖流域属湿润的北亚热带季风气候, 年平均气温  $15^{\circ}C$ — $17^{\circ}C$ , 年平均降水量约为 1010—1400mm, 全年日照时数约为 2019h, 全年无霜期 220d 左右<sup>[8]</sup>。太湖流域以平原为主, 占总面积的 4/6, 流域耕地面积为 1.5 万平方千米, 耕作土壤类型为水稻土, 土壤质地为沙壤土, 主要作物种植制度为冬小麦/夏水稻一年两熟制。

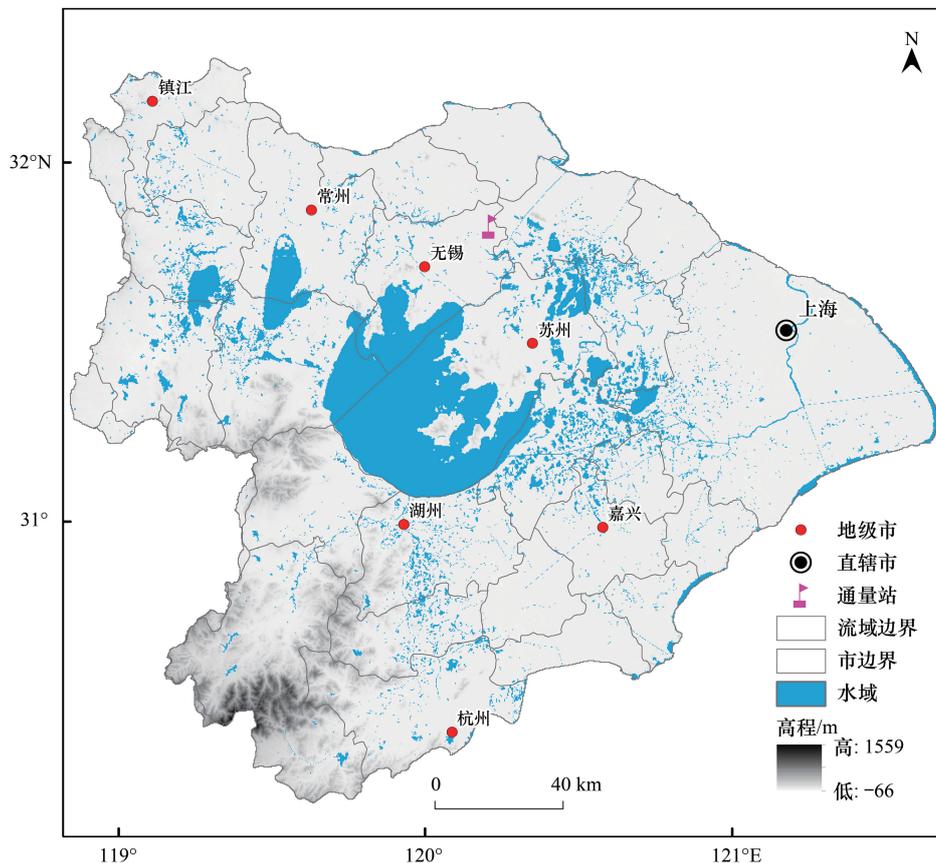


图 1 太湖流域区位图

Fig.1 The location of the Taihu Lake Basin

## 2 研究方法与数据

### 2.1 APSIM 模型简介

APSIM 模型是由澳大利亚联邦科工组织以及昆士兰州政府的农业生产系统组 (APSRU) 所开发的可用于

模拟农业生产系统中各主要组成部分的作物模型<sup>[19-20]</sup>,其核心模块包括:(1)生物模块—主要为作物模块,可以很好的模拟种植制度对于土壤的累加影响;(2)土壤模块—主要有土壤水平衡过程和土壤氮、磷的运移;(3)管理模块—主要包括播种期、收获期、施肥灌溉强度等的设置。APSIM 模型的主要优点包括:(1)集成所需要的相关模块,发挥模型高度模块化优势<sup>[21]</sup>;(2)模型灵活性强,能够兼容不同编程语言编写的模块,且模型源代码公开有利于二次开发<sup>[22]</sup>;(3)APSIM 模型适用范围广,目前能够模拟 30 多种作物<sup>[23]</sup>。APSIM 模型目前已在澳洲、中国、东南亚等多个国家应用,主要集中在农田生态系统生产潜力与气候变化影响评估<sup>[24]</sup>、固碳与温室气体排放<sup>[25]</sup>、生态系统服务权衡<sup>[26]</sup>等方面;国内对 APSIM 模型应用较少,主要用于气候变化评估<sup>[27]</sup>和农田管理<sup>[28]</sup>。

## 2.2 模型率定

### 2.2.1 PEST 软件参数优化算法

模型参数化是实现 APSIM 模型各项功能的首要前提,不同区域在地理环境特征、气候、土壤特征、作物参数指标等方面存在着显著差异。目前运用较多的参数校准方法中,自动校准比人工校准更客观且高效,由 Doherty 开发的 PEST(Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis)软件是自动校准软件的典型代表,主要通过模型输入输出文件与之建立联系,无需改变原模型结构和源代码,且其运算效率比遗传算法、SCE-UA 法和 Gauss-Marquardt-Levenberg 等高(迭代次数一般小于 30 次即逼近最优值),被应用于各类模型参数率定和不确定性估计<sup>[29]</sup>。PEST 软件采用结合梯度下降法和高斯牛顿法的非线性 Gauss-Marquardt-Levenberg 算法,同时具备梯度下降法的全局搜索性和高斯牛顿法的快速收敛性,通过多维参数空间内优化模型输入参数使模型观测值与实测值间差异最小。本研究利用包括 0—10cm 土壤温度、10—20cm 土壤温度、水稻生物量、小麦生物量等 4 组目标函数,其公式如下:

$$\varphi = \varphi_{st1} + \varphi_{st2} + \varphi_{rb} + \varphi_{wb} = \sum_{i=1}^{q_{st1}} (O_{st1i} - S_{st1i})^2 \varepsilon_{st1}^2 + \sum_{i=1}^{q_{st2}} (O_{st2i} - S_{st2i})^2 \varepsilon_{st2}^2 + \sum_{i=1}^{q_{rb}} (O_{rbi} - S_{rbi})^2 \varepsilon_{rb}^2 + \sum_{i=1}^{q_{wb}} (O_{wbi} - S_{wbi})^2 \varepsilon_{wb}^2$$

式中: $\varphi$ 为目标函数, $O_i$ 和 $S_i$ 分别代表第 $i$ 个实测值和模型观测值; $q$ 代表实测值数量; $\varepsilon$ 代表权重系数;下标 $st1$ 、 $st2$ 、 $rb$ 和 $wb$ 分别对应 0—10cm 土壤温度、10—20cm 土壤温度、水稻生物量、小麦生物量。

### 2.2.2 APSIM 模型校准

采用 PEST 软件对 APSIM 模型校准步骤如下:

(1)APSIM 模型输入参数众多,在进行校准前首先对参数进行敏感性分析,剔除不敏感参数;确定 APSIM 模型需估计的输入参数、各参数初始值和取值范围。本研究待优化参数的选择及取值范围参考实测数据和相关文献确定。

(2)建立 PEST 软件运行所需的模板文件(\*.tpl:定义模型输入文件参数)、指令文件(\*.ins:定义模型的观测数据)、控制文件(\*.pst:控制变量并调用模板文件和指令文件)。

(3)利用 TEMPCHEK、INSCHEK、PESTCHEK 等模块分别检查模板文件、指令文件和控制文件,指令通过后利用 PEST 模块执行控制文件,根据控制文件中给定的路径自动调用 APSIM 模型程序。结果显示,优化次数为 8 次,共调用 APSIM 模型 1826 次即可获得最佳的模型率定效果。

(4)采用模拟结果与实测值之间  $R^2$  拟合系数、一致性指数(D)、纳什系数(NSE)和标准化均方根误差(NRMSE)4 个指标来评价模型的率定与验证效果。利用 2015 年水稻生物量、小麦生物量、0—10cm 土壤温度、10—20cm 土壤温度数据进行模型率定,采用 2017 年小麦生物量、0—10cm 土壤温度(半年)、10—20cm 土壤温度(半年)进行模型验证。如表 1 所示,PEST 参数优化后 APSIM 模拟出的小麦生物量、水稻生物量、0—10cm 土壤温度和 10—20cm 土壤温度与实测值的  $R^2$ 和一致性指数 D 均大于 0.85,NRMSE 均小于 0.1,表明模型模拟值与实测值之间误差较小,模型率定效果较好;从 NSE 系数看,生物量的模拟效果略优于土壤温度。总体而言,PEST 软件在 APSIM 模型参数率定中不仅有效提高了模型模拟精度,同时大幅节约反复迭代调试

时间,提高了模型率定效率。

表 1 模型率定与验证效果评价

Table 1 The evaluation of model calibration and verification

	模型率定效果 Model calibration				验证结果 Model verification		
	小麦生物量 Wheat biomass	水稻生物量 Rice biomass	0—10cm 土壤温度 0—10cm soil temperature	10—20cm 土壤温度 10—20cm soil temperature	小麦生物量 Wheat biomass	0—10cm 土壤温度 0—10cm soil temperature	10—20cm 土壤温度 10—20cm soil temperature
$R^2$	0.996	0.994	0.945	0.944	0.973	0.868	0.875
D	0.999	0.998	0.985	0.984	0.978	0.902	0.918
NSE	0.995	0.993	0.734	0.780	0.971	0.859	0.858
NRMSE	0.023	0.029	0.067	0.069	0.031	0.024	0.022

### 2.3 权衡/协同关系分析

自组织映射(Self-Organizing Map, SOM)是20世纪80年代芬兰教授Teuvo Kohonen提出的一种非监督学习的人工神经网络,SOM聚类是输入高维向量空间向二位平面的映射,同时还保留原始数据的拓扑结构和度量关系,不像传统统计方法需分析数据满足正态性或线性的要求。目前,SOM在耕地质量评价<sup>[30]</sup>、城市等级识别<sup>[31]</sup>、环境水质<sup>[32]</sup>等研究方面应用较多,在生态系统服务研究方面较少涉及。本研究基于MATLAB R2013a软件,应用SOM toolbox 2.0工具箱,输入数据为太湖流域1986—2015年16种情景模拟的粮食供给(粮食产量)、水质调节(氮流失量)和气候调节( $N_2O$ 排放量、固碳-土壤有机碳),共1920个样本数,分析三种生态系统服务权衡/协同关系,通过200次迭代训练样本,最终得到稳定的自组织映射图。SOM图上位置、距离与颜色分布模式显示生态系统服务间的半定量关系,根据神经元所对应对象的属性值大小,直观表现为颜色深浅不同,颜色越深表示生态系统服务越大。为验证SOM方法准确性与可靠性,本研究利用Pearson相关分析进一步验证生态系统服务间的权衡协同关系。

### 2.4 情景设置与模拟

秸秆还田能有效改善土壤理化性质和生物学性状,提高农作物产量并降低施肥成本<sup>[33]</sup>,但我国农业生产中作物秸秆、残留物等资源浪费严重,利用率不足30%<sup>[34]</sup>。高农业集约化的太湖流域化肥消费量占全国的1.3%,而化肥利用率仅30%—35%,低化肥利用效率与高化肥施用量是造成太湖流域农田面源污染的重要因素。针对太湖流域化肥施用量大、秸秆循环利用率低等突出问题,结合农业部2017年对太湖流域小麦和水稻的施肥建议,通过设置不同秸秆还田和施肥模式(见表2),探讨其对太湖流域农田生态系统3种主要生态系统服务的影响及其权衡协同关系。

表 2 情景模拟设置

Table 2 Scenarios of model simulation

	无秸秆还田(S0) Non-straw returning(S0)	稻秆还田麦秆不还田(S1) Rice straw-returning and non-wheat straw- returning(S1)	麦秆还田稻秆不还田(S2) Wheat straw-returning and non-rice straw- returning(S2)	稻麦秆全还田(S3) All straw-returning(S3)
不减量施肥(F0) No fertilizer reduction(F0)	S0_F0	S1_F0	S2_F0	S3_F0
减量施肥5%(F1) 5% fertilizer reduction(F1)	S0_F1	S1_F1	S2_F1	S3_F1
减量施肥10%(F2) 10% fertilizer reduction(F2)	S0_F2	S1_F2	S2_F2	S3_F2
减量施肥20%(F3) 20% fertilizer reduction(F3)	S0_F3	S1_F3	S2_F3	S3_F3

## 2.5 数据来源

APISM 模型所需输入的最高温、最低温、太阳辐射量和降水量等气象数据从国家气象信息中心共享获取;模型校准与验证所需的土壤温度、生物量等目标函数数据来源于无锡典型稻麦轮作农田生态系统通量塔观测获取的 2015 年和 2017 年 30min 通量数据,采用 ChinaFLUX 通用数据处理流程(包括三次坐标旋转、WPL 校正、阈值剔除、Q10 算法等)插补拆分得 0—10cm 土壤温度、10—20cm 土壤温度、水稻生物量、小麦生物量等数据,试验区位于无锡市锡山区羊尖镇严家桥(N31°39'14",E120°32'43",海拔 6m),为江苏省基本农田保护区,作物种植制度为冬小麦/夏水稻一年两熟制<sup>[8]</sup>,农业生产由村委会集体统一管理,记录了粮食单位产量、施肥量、施肥种类、灌溉等管理措施;土壤数据来源于农田小区径流场观测数据(常熟农业生态试验站),两站点直线距离约 19 公里,其土壤类型、质地和其他属性均一致。

## 3 结果分析

### 3.1 不同情景生态系统服务变化趋势

S0\_F0 基准模拟(现实情况)下,1986—2015 年太湖流域粮食产量在 8—11t/hm<sup>2</sup> 间平缓波动,整体呈略微上升趋势;土壤有机碳总量显著上升,30 年增强了 4.43%;N<sub>2</sub>O 排放量在 0—0.5kg/hm<sup>2</sup> 间波动,30 年共排放了 5.4kg/hm<sup>2</sup>;1986—2015 年氮流失量整体为波动上升趋势,分别在 1998 年和 2009 年出现峰值(图 2-a1, b1, c1 和 d1),查阅气象数据发现 1998 年和 2009 年降雨量比其他年份增加 13%,出现峰值可能与当年降雨量密切相关。

在无秸秆还田情景下,1986—2015 年的粮食产量、土壤有机碳、氮流失量和 N<sub>2</sub>O 排放量基本随着施肥量的减少而下降,即 S0\_F0>S0\_F1>S0\_F2>S0\_F3;2006 年 N<sub>2</sub>O 排放量在减量施肥 20% 情景下略高出其余情景 0.1—0.2kg/hm<sup>2</sup>(图 2-a1, b1, c1 和 d1)。稻秆还田麦秆不还田情景下,减量施肥对土壤有机碳影响较大,2015 年减施肥量 5%、10%、20% 后分别骤降 1.3%、1.6%、2.19%;N<sub>2</sub>O 排放量较无秸秆还田情况下有明显上升趋势,1989 年和 2006 年上涨 3—5 倍且随着施肥量的减少 N<sub>2</sub>O 略有上升(图 2-a2, b2, c2 和 d2)。在麦秆还田稻秆不还田情景下,2008—2013 年氮流失量较无秸秆还田与稻秆还田麦秆不还田情景略有上升,其中 2013 年不减量施肥情景下大约增强了 45%(图 2-a3, b3, c3 和 d3)。在稻麦秆全还田情景下,1986—2015 土壤有机碳显著低于其余还田模式;不减量施肥情景下 N<sub>2</sub>O 排放量明显高于其余还田模式,减量施肥后排放量骤降,2005—2015 年基本归于 0;氮流失量逐年波动增长,2005—2013 年剧烈波动(图 2-a4, b4, c4 和 d4)。

### 3.2 不同情景生态系统服务变化特征

表 3 为在不同情景下 1986—2015 生态系统服务平均值较 S0\_F0 基准模拟之间的差异,表明相较基准模拟,其余 15 种情景下的粮食产量平均变化量均为负数,同一秸秆还田模式下,粮食产量随施肥量的减少而加剧减产;不减量施肥情景下(S0\_F0、S1\_F0、S2\_F0 和 S3\_F1)表现为无秸秆还田(S0)>麦秆还田稻秆不还田(S2)>稻秆还田麦秆不还田(S1)>稻麦秆全还田(S3),减量施肥 5%、10% 和 20% 情景下均表现为麦秆还田稻秆不还田(S2)>无秸秆还田(S0)>稻秆还田麦秆不还田(S1)>稻麦秆全还田(S3),相互间差距较小,约为 0.5%—1%。不同管理模式对土壤有机碳影响最小,减少量均小于 1.5%。N<sub>2</sub>O 排放和氮流失量受不同管理模式影响显著,不减量施肥情况下(S1\_F0、S2\_F0 和 S3\_F0)N<sub>2</sub>O 平均变化量均超过 70%,氮流失量在麦秆还田稻秆不还田(S2\_F0)情景下亦呈增强状态;稻秆还田麦秆不还田(S1)情景下 N<sub>2</sub>O 平均变化量均大于 0,而氮流失量是所有还田模式在减少相同施肥量条件下流失量最少;稻麦秆全还田且减量施肥(S3\_F1、S3\_F2、S3\_F3)情景下对抑制 N<sub>2</sub>O 排放最有效,平均减排量均在 30% 以上,氮流失量平均变化量均小于 0,呈良好的发展态势。

### 3.3 生态系统服务权衡与协同关系分析

如图 3 所示,粮食供给与固碳空间格局存在明显的相似性,由右向左的神经元颜色变化趋势均从深到浅;水质调节与粮食供给、固碳则存在显著性相反趋势,神经元值由左向右逐渐降低;N<sub>2</sub>O 排放图与其他具有明显

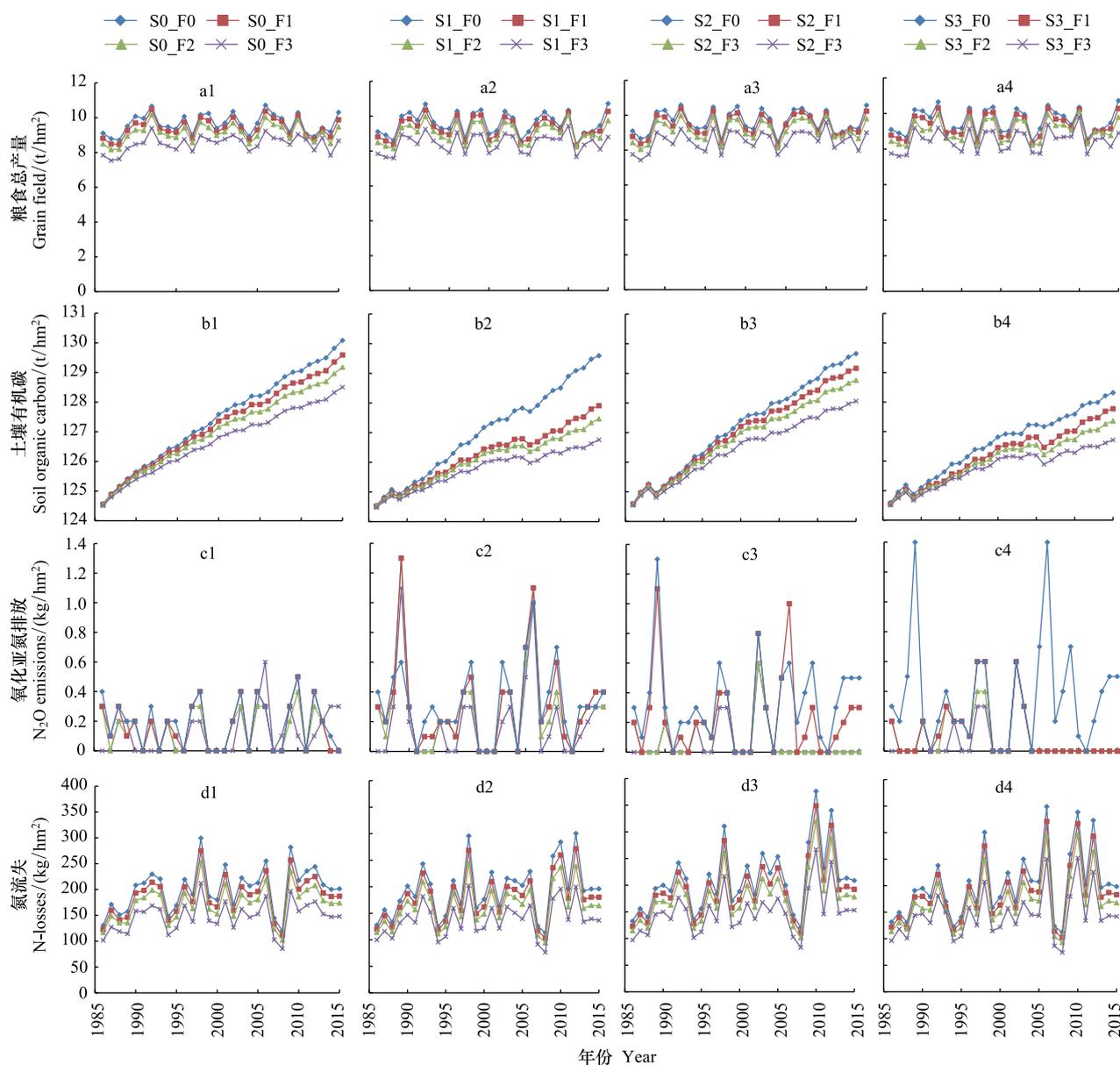


图2 1986—2015年不同秸秆还田和施肥模式下生态系统服务变化

Fig.2 Changes in ecosystem services under different straw-returning and fertilizer use modes in 1986—2015

图中 a、b、c、d 分别代表粮食产量、土壤有机碳、氧化亚氮排放量和氮流失量；1、2、3、4 分别代表无秸秆还田、稻秆还田麦秆不还田、麦秆还田稻秆不还田、稻麦秆全还田

表3 不同情景 1986—2015 年生态系统服务平均变化量

Table 3 Average changes of ecosystem services under different scenarios in 1986—2015

情景设置 Scenarios	粮食产量 Grain field	土壤有机碳 Soil organic carbon	氧化亚氮排放 N <sub>2</sub> O emissions	氮流失量 N-losses
S0_F0	0.00	0.00	0.00	0.00
S0_F1	-2.54%	-0.18%	-9.26%	-7.29%
S0_F2	-5.44%	-0.34%	-25.93%	-14.06%
S0_F3	-11.81%	-0.61%	-33.33%	-26.73%
S1_F0	-0.69%	-0.34%	77.78%	-3.75%
S1_F1	-3.32%	-0.96%	70.37%	-11.09%
S1_F2	-6.20%	-1.10%	50.00%	-18.18%

续表

情景设置 Scenarios	粮食产量 Grain field	土壤有机碳 Soil organic carbon	氧化亚氮排放 N <sub>2</sub> O emissions	氮流失量 N-losses
S1_F3	-12.39%	-1.35%	5.56%	-30.78%
S2_F0	-0.17%	-0.17%	79.63%	4.34%
S2_F1	-2.44%	-0.35%	31.48%	-3.81%
S2_F2	-5.23%	-0.51%	-51.85%	-11.48%
S2_F3	-11.49%	-0.79%	-64.81%	-25.61%
S3_F0	-0.89%	-0.69%	101.85%	-0.25%
S3_F1	-3.43%	-0.98%	-37.04%	-7.89%
S3_F2	-6.43%	-1.13%	-46.30%	-15.25%
S3_F3	-12.08%	-1.33%	-64.81%	-27.80%

的差异,神经元高值约占图幅 1/2,其右上角高值区与粮食产量供给图有重叠现象,左下角低值区与水质调节图呈相反趋势,与固碳相关性较低。利用 Pearson 相关分析得出如表 4 所示的生态系统服务间的相关系数,粮食供给与固碳、N<sub>2</sub>O 排放呈显著正相关,与水质调节呈非常显著负相关;固碳与水质调节呈非常显著负相关,与温室气体为弱负相关;水质调节与 N<sub>2</sub>O 排放为显著负相关。由此可得,粮食供给与固碳、N<sub>2</sub>O 排放均存在较显著的协同关系;粮食供给与水质调节、固碳与水质调节、水质调节与 N<sub>2</sub>O 排放两两之间存在显著的权衡关系,固碳与 N<sub>2</sub>O 排放呈弱权衡关系。

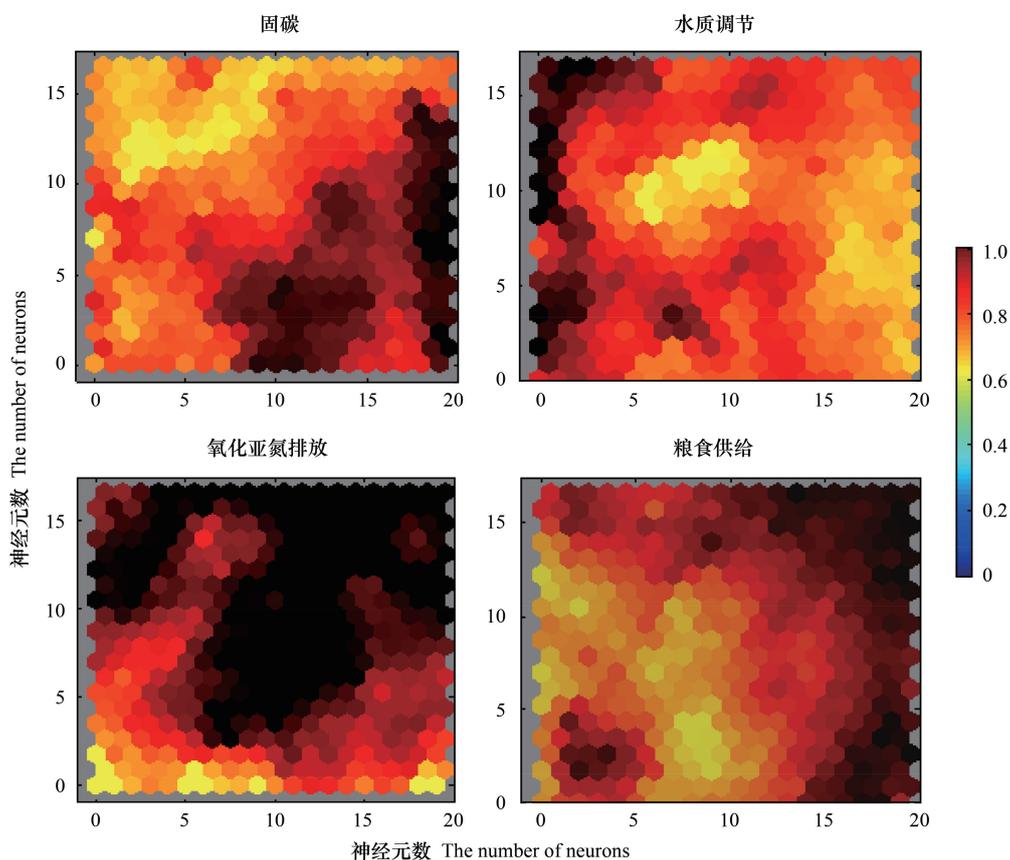


图 3 基于 SOM 的生态系统服务间权衡/协同关系

Fig.3 Trade-off and synergy of ecosystem services based on the SOM

表 4 生态系统服务间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between ecosystem services

	粮食供给 Grain supply	固碳 Carbon sequestration	水质调节 Water quality regulation	氧化亚氮排放 N <sub>2</sub> O emissions
粮食供给 Grain supply		0.117 *	-0.288 **	0.092 *
固碳 Carbon Sequestration			-0.330 **	-0.064
水质调节 Water quality regulation				-0.092 *
氧化亚氮排放 N <sub>2</sub> O emissions				1.000

\* \*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ 

#### 4 讨论

N<sub>2</sub>O排放主要来源于土壤硝化和反硝化作用,受气候条件、土壤性质和农田管理措施等因素影响。已有研究表明施氮量较低时,秸秆还田对N<sub>2</sub>O排放为负效应,而施氮量逐渐增加大,秸秆还田对N<sub>2</sub>O排放为正效应<sup>[35]</sup>,这可能是导致不减量施肥情景下,秸秆还田情景(S1、S2和S3)N<sub>2</sub>O排放远超基准模拟的原因,同时也影响了不减量施肥情景下由于N<sub>2</sub>O排放过量排放导致氮素供应不足,土壤养分多度消耗使得粮食产量微量减少<sup>[36]</sup>。

大量的研究表明,秸秆还田模式可提高土壤有机碳含量<sup>[37-38]</sup>,本研究中土壤有机碳含量在秸秆还田情景下均有微量减少趋势(减少量均小于1.5%)。导致这种情况发生的原因可能与APSIM模型对土壤有机碳的模拟精度有待进一步加强,与现实情况存在误差,需进一步利用土壤有机碳实测数据率定模型参数;也有可能是模型校准的不确定性导致,PEST率定过程中参数敏感度差异较大,需改进参数权重设置,对APSIM模型碳模块作进一步的参数校准验证,以提高PEST率定的准确性。

气候变化影响粮食产量的变化幅度约3%—5%,个别年份达10%,粮食减产幅度小于5%对整体粮食安全影响较小<sup>[39]</sup>。因此,在保证N<sub>2</sub>O排放量和氮流失量低于基准模拟且粮食单位产量减产幅度小于5%(由于1986—2015年土壤有机碳变化量小,对整体的影响可忽略不计)情况下,无秸秆还田且减量施肥5%(S0\_F1)和稻麦秆全还田且减量施肥5%(S3\_F1)两种管理模式是16种情景模拟中最适宜太湖流域的农田管理措施。本研究选取最适宜的农田管理措施方式相对较为理想化,实际农田管理中除了农业措施方面的考量外,政府政策对于农业生产活动影响巨大,在本研究中没有考虑政策影响,有待后续工作进一步补充完善。

本研究将APSIM模型引入农田生态系统服务研究,利用情景模拟和自组织映射分析太湖流域三种农田生态系统服务30年发展趋势及其权衡关系,以此得到最适宜太湖流域的农田管理措施,这对稻麦轮作的农田生态系统管理具有重要的科学意义。受模型模拟限制,本研究选取粮食供给(粮食产量)、水质调节(氮流失量)和气候调节(N<sub>2</sub>O排放量、固碳-土壤有机碳)等三种生态系统服务来分析太湖流域农田生态系统变化趋势,缺乏对文化服务和支持服务等探讨,有待后续研究进一步扩展。同时,本研究主要从时间维度探讨不同管理方式太湖流域农田生态系统服务变化及权衡/协同关系,缺乏空间维度的考量与横向比较以及不同模式的综合效应评估,有待后续进一步在流域尺度上模拟与分析拓展研究。

#### 5 结论

基准模拟(S0\_F0)情景中,1986—2015年太湖流域粮食产量、土壤有机碳和氮流失量呈波动上升趋势,不同秸秆还田方式情景下粮食产量变化相对较小。在仅还田不减量施肥情景下,N<sub>2</sub>O排放量和氮流失量均高于基准模拟。除基准模拟(S0\_F0)外,其他15种情景模拟的粮食产量和土壤有机碳平均值均低于基准模拟值。稻麦秆全还田且减量施肥5%、10%或20%情景对抑制N<sub>2</sub>O排放最有效,减排量超过30%,氮流失量亦低于基准模拟。粮食供给与固碳、N<sub>2</sub>O排放存在较为显著的协同关系;粮食产量与水质调节、固碳与水质调节、水质调节与N<sub>2</sub>O排放显著权衡;固碳与N<sub>2</sub>O排放呈弱权衡关系。需进一步收集土壤有机质采样数据率定与改进

APSIM 模型以提高土壤有机碳模拟精度,同时需扩展流域尺度上太湖流域生态系统服务变化及不同模式影响的综合效应评估。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Con M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [ 2 ] Xiao T J, Yang Q S, Ran W, Xu G H, Shen Q R. Effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungus on nitrogen and phosphorus utilization in upland rice-mungbean intercropping system. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(4): 528-535.
- [ 3 ] Itoh M, Sudo S, Mori S, Saito H, Yoshida T, Shiratori Y, Suga S, Yoshikawa N, Suzue Y, Mizukami H, Mochida T, Yagi K. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(3/4): 359-372.
- [ 4 ] 朱铁辉, 韩昕儒, 陈永福. 中低产田改造地区优先序研究. *农业技术经济*, 2012, (4): 65-72.
- [ 5 ] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 刘宏斌, 王立刚, 逢焕成. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [ 6 ] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出. *地理学报*, 2004, 59(3): 401-408.
- [ 7 ] 洪传春, 刘某承, 李文华. 我国化肥投入面源污染控制政策评估. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 1-6.
- [ 8 ] 徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(20): 6655-6665.
- [ 9 ] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 645-651.
- [ 10 ] 叶延琼, 章家恩, 秦钟, 李逸勉, 李韵. 佛山市农田生态系统的生态损益. *生态学报*, 2012, 32(14): 4593-4604.
- [ 11 ] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Liu J P, Hu H Z. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [ 12 ] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [ 13 ] Rodríguez J P, Beard Jr T D, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [ 14 ] Locatelli B, Imbach P, Wunder S. Synergies and trade-offs between ecosystem services in Costa Rica. *Environmental Conservation*, 2014, 41(1): 27-36.
- [ 15 ] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Bode M, Richardson D M. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. *Biological Conservation*, 2009, 142(3): 553-562.
- [ 16 ] 王雅, 蒙吉军, 齐杨, 彭福利. 基于 InVEST 模型的生态系统管理综述. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3526-3532.
- [ 17 ] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [ 18 ] 孙小祥, 杨桂山, 欧维新, 徐昔保. 太湖流域耕地变化及其对生态服务功能影响研究. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1675-1685.
- [ 19 ] Asseng S, van Keulen H, Stol W. Performance and application of the APSIM N-wheat model in the Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12(1): 37-54.
- [ 20 ] Asseng S, Keating B A, Fillery I R P, Gregory P J, Bowden J W, Turner N C, Palta J A, Abrecht D G. Performance of the APSIM-Wheat model in Western Australia. *Field Crops Research*, 1998, 57(2): 163-179.
- [ 21 ] Holzworth D, Huth N I, Fainges J, Brown H, Zurcher E, Cichota R, Verrall S, Herrmann N I, Zheng B, Snow V. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling and Software*, 2018, 103:43-51.
- [ 22 ] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, McCown R L, Freebairn D M, Smith C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 267-288.
- [ 23 ] 沈禹颖, 南志标, Bellotti B, Robertson M, 陈文, 邵新庆. APSIM 模型的发展与应用. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1027-1032.
- [ 24 ] Carberry P S, Liang W L, Twomlow S, Holzworth D P, Dimes J P, McClelland T, Huth N I, Chen F, Hochman Z, Keating B A. Scope for improved eco-efficiency varies among diverse cropping systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8381-8386.
- [ 25 ] O'Leary G J, Liu D L, Ma Y C, Li F Y, McCaskill M, Conyers M, Dalal R, Reeves S, Page K, Dang Y P, Robertson F. Modelling soil organic carbon I. Performance of APSIM crop and pasture modules against long-term experimental data. *Geoderma*, 2016, 264: 227-237.
- [ 26 ] Baudron F, Delmotte S, Corbeels M, Herrera J M, Tittone P. Multi-scale trade-off analysis of cereal residue use for livestock feeding vs. soil

- mulching in the Mid-Zambezi Valley, Zimbabwe. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 97-106.
- [27] 肖登攀, 陶福禄. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1539-1545.
- [28] 戴彤, 王靖, 赫迪, 王娜. 1961—2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析. *中国生态农业学报*, 2016, 24(3): 293-305.
- [29] 高伟, 周丰, 董延军, 郭怀成, 彭俊台, 徐鹏, 赵磊. 基于 PEST 的 HSPF 水文模型多目标自动校准研究. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 855-867.
- [30] 鄢瑞卿, 关侠, 鄢旭久, 窦世翔, 赵玲. 基于自组织神经网络的耕地自然质量评价方法及其应用. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 298-305.
- [31] 杨志民, 化祥雨, 叶娅芬, 邵元海. 金融空间联系与 SOM 神经网络中心等级识别——以浙江省县域为例. *经济地理*, 2014, 34(12): 93-98.
- [32] 李伟, 姚笑颜, 梁志伟, 吴一鸣, 施积炎, 陈英旭. 基于自组织映射与哈斯图方法的地表水水质评价研究. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 893-903.
- [33] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 钱海燕. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响. *生态学报*, 2014, 34(13): 3779-3787.
- [34] 汪文. 我国秸秆利用率近七成. *北京农业*, 2011, (7): 42-42.
- [35] 张冉, 赵鑫, 濮超, 刘胜利, 薛建福, 张向前, 陈阜, 张海林. 中国农田秸秆还田土壤 N<sub>2</sub>O 排放及其影响因素的 Meta 分析. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 1-6.
- [36] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 李晓, 王朝辉. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853-863.
- [37] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 张锡金. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130-135.
- [38] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 王旭东. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 25-32.
- [39] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 吴良, 鲁春霞, 郭金花, 曲婷婷, 刘刚, 沈镭, 成升魁. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 927-939.