

DOI: 10.5846/stxb202005101165

邵主恩, 赵西宁, 高晓东, 王绍飞, 王宪志, 吴普特. 基于 STICS 模型的黄土高原苹果园生态系统服务评估. 生态学报, 2021, 41(6): 2212-2224.

Shao Z E, Zhao X N, Gao X D, Wang S F, Wang X Z, Wu P T. Assessing ecosystem services in apple orchard in the Loess Plateau based on STICS model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2212-2224.

基于 STICS 模型的黄土高原苹果园生态系统服务评估

邵主恩^{1,2}, 赵西宁^{1,3}, 高晓东^{1,3}, 王绍飞², 王宪志², 吴普特^{1,3,*}

1 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 苹果园在确保最大生产力的同时应当考虑环境和自然资源, 如何权衡其生态系统服务是苹果园可持续发展面临的重要问题之一。利用大田试验和 STICS 模型相结合的方法研究农业管理措施和气候对黄土高原苹果园生态系统服务的影响, 并在此基础上对黄土高原南部半湿润区和北部半干旱区土壤氮可利用性、气候调节、水循环调节和果实生产四种苹果园生态系统服务进行了系统的评估。结果表明: (1) STICS 模型均能较好模拟白水和子洲试验果园的产量、单果重、土壤含水量和蒸散发等生态系统服务指标; (2) 除固碳与产量、单果重及果树相关指标是协同关系以外, 其他生态系统服务之间都是权衡关系; (3) 对于各管理措施下的果园平均服务标准值, 秸秆覆盖(0.67) > 地布覆盖(0.52) > 清耕(0.30), 充分灌溉(0.56) > 轻度亏缺灌溉(0.44) > 重度亏缺灌溉(0.30), 其中秸秆覆盖和充分灌溉的果园服务概况最佳, 地布覆盖和轻度亏缺灌溉的果园服务概况较相似且最平衡; (4) 地布覆盖和轻度亏缺灌溉管理措施缓和权衡作用的效果优于其他管理措施。综上所述, STICS 模型能够较好的量化果园生态系统服务概况, 农业管理措施是果园生态系统服务强有力的驱动因子。

关键词: 苹果园; 生态系统服务; 评估; 作物模型; STICS 模型

Assessing ecosystem services in apple orchard in the Loess Plateau based on STICS model

SHAO Zhu en^{1,2}, ZHAO Xin ing^{1,3}, GAO Xiao dong^{1,3}, WANG Shao fei², WANG Xian zhi², WU Pu te^{1,3,*}

1 Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

Abstract: Apple orchards face the major challenge of ensuring maximal productivity with due consideration for the environment and natural resource. How to balance its ecosystem services is one of the important issues facing the sustainable development of apple orchards. The field experiment and the STICS model were used to study the impacts of agricultural management and climate on the ecosystem services of apple orchards in the Loess Plateau of China. And on this basis, four apple orchard ecosystem services including soil nitrogen availability, climate regulation, water circulation regulation, and fruit production were systematically evaluated in the south semi-humid and north semi-arid regions of the Loess Plateau of China. This model was parameterized by using data collected on two experimental apple orchard sites under irrigating and mulching management in the Loess Plateau. The results showed that: (1) the STICS models could well simulate the ecosystem service indicators such as yield, fruit mass, soil water content, and evapotranspiration of the Baishui and Zizhou

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0400204); 国家自然科学基金项目(41771316); 陕西省重点研发计划(2020ZDLNY07-04)

收稿日期: 2020-05-10; **网络出版日期:** 2021-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

experimental orchards. (2) Except for the synergies between carbon sequestration and yield, fruit mass and fruit-related indicators, there is a trade-off relationship among other ecosystem services. The contribution of carbon allocation to fruit in sequestered carbon was considerable. Nitrogen absorption, impacted by mulch and irrigation, was a major driver of these ecosystem service relationships. (3) For the average service standard value of the orchard under various management measures, straw mulching (0.67) > film mulching (0.52) > clearing cultivation (0.30), comfort irrigation (0.56) > low water stress irrigation (0.44) > high water stress irrigation (0.30). The service profile of the orchard with straw mulching and comfort irrigation were the best. And the service profile of the orchard with film mulching and low water stress irrigation were similar and the most balanced, showing higher yield, fruit mass and soil water content but lower N_2O emission. (4) The effect of mitigating trade-offs of straw mulching and low water stress irrigation are better than other management measures, and these two apple orchards are the most ideal orchards. In summary, the STICS model can quantify orchard ecosystem services profiles well, and agricultural management is a powerful driving factor of orchard ecosystem services.

Key Words: apple orchard; ecosystem service; assess; crop model; STICS model

黄土高原是全球最大的优质苹果主产区,种植面积和产量均超过全球的 25%^[1-2],干旱缺水和土壤肥力低下是限制该地区农业生产与生态建设的主要因素^[3]。黄土高原苹果园生态系统服务能力较强,能够创造巨大的经济和生态效益。生态系统服务是指生态系统所形成与维持的人类赖以生存和发展的环境与效用^[4-5]。果园是农业生态系统的重要组成部分,不仅提供了果实产品的市场服务,还提供了其他的非市场服务,固碳潜力较大^[6];但果园也会造成大量温室气体排放^[7],对人类健康、环境产生负面影响。果园生态系统服务有利于保持较高的果实生产水平,也利于保护水分和土壤等自然资源以及矿化等生态系统功能^[8-10]。气候和农业管理措施对果园生态系统功能的动态联系和不同反应产生了果园生态系统服务的协同和权衡作用,然而量化这些作用是比较困难的。因此,开展苹果园生态系统服务研究对黄土高原苹果园绿色可持续生产具有重要作用。

研究不同空间尺度的生态系统服务已成为当前热点问题^[11],其中模型模拟是有效且可靠的手段^[12]。基于模型的生态系统服务研究多局限于区域和国家尺度,而田块尺度上的生态系统服务研究相对较少。例如,常见的区域和国家尺度上的生态系统服务评估模型有 InVEST、ARIES 等模型,这些模型已在北美和中国等多地取得了良好的模拟效果^[13]。但是上述模型结构较为简化,模型参数缺乏率定和验证,导致在田块尺度的生态系统服务研究中存在较大的不确定性^[14],而研究田块尺度上的生态系统服务有利于解析区域和国家尺度上的生态系统服务的复杂性特征。在田块尺度上使用作物模型能够规范农业生态系统的功能、服务、相互联系和动态响应,诸如 APSIM^[15]、CropSyst^[16]和 DSSAT^[17]等作物模型已经广泛用于模拟农业生态系统中的特定功能,但很少有研究使用这些作物模型分析多种生态系统服务概况,且这些作物模型难以模拟多年生木本作物。而 STICS(Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard)模型^[18]具有强大的通用性和可操作性等特点,能够应对苹果园不同的土壤、气候和管理方案,可以较好地对苹果园进行模拟,且已经在法国苹果园生态系统服务方面得到初步应用^[19-20]。

基于 STICS 模型研究农业管理措施和气候对苹果园生态系统服务的影响,并在此基础上对黄土高原地区土壤氮可利用性、气候调节、水循环调节和果实生产四种苹果园生态系统服务进行系统的评估,以此为果园生态系统管理提供依据,从而实现黄土高原地区经济和生态和谐发展。

1 材料与方法

1.1 试验布设

试验区一位于陕西省渭南市白水县西北农林科技大学苹果园试验基地(35°4'N, 109°16'E),属暖温带大陆性季风气候,土壤主要为黄绵土,田间持水量为 23%,土壤 pH 为 8.2,多年平均气温 11.4℃,多年平均降水

量 550.8 mm,降水年际变化大,无霜期为 207 d。选取 6 年生矮化自根砧红富士苹果,砧木为 M26,株行距 1 m×4 m,南北向种植。

该试验设黑色园艺地布覆盖、秸秆覆盖及清耕无覆盖 3 个处理,每处理 3 行,每行 40 株,4 次重复,共 12 个小区。选择生长健壮,树势中庸,无病虫害果树进行试验布设,试验期间除覆盖处理不同外,各处理其他管理措施一致。

试验区二位于陕西省榆林市子洲县清水沟山地有机苹果种植基地(37°27'N,110°20'E),属暖温带半湿润大陆性季风气候区。土壤类型主要为黄绵土,田间持水量为 21.7%,多年平均气温 9.1℃,多年平均降水量 453.6 mm,主要集中在 7—9 月份,无霜期为 164 d。选取 8 年生、矮化中熟品种蜜脆苹果,种植株行距为 2 m×3.5 m,东西向种植。

该试验设有 3 个灌水处理,充分供水:85% θ_f (θ_f 为田间持水量)、轻度亏缺:75% θ_f 、重度亏缺:50% θ_f 。每个处理设置 3 个重复,各小区其他管理措施一致且都是裸地清耕。采用滴灌方式灌水,每个种植行左右设置两根滴灌管,滴灌管顺种植行布置,滴头流量 3 L/h,滴头间距 30 cm,灌水时间分别为 5 月 9 日、5 月 16 日和 5 月 31 日,总共 3 次,总灌水量分别为 50、40、30 mm。

两个试验地具体的管理措施以及逐日气温和太阳辐射如表 1 和图 1 所示:

表 1 STICS 模型对苹果园参数化和评估的六个果园系统的主要特性

Table 1 Main characteristics of six orchard systems parameterized and evaluated by the STICS model for apple orchards

苹果园生态系统 Apple ecosystem	地点 Location	年份 Year	年降雨量 Annual rainfall/mm	树龄 Tree age/a	品种 Cultivar	农业管理措施 Agricultural management
1	白水	2017	562.7	6	红富士	清耕
2	白水	2017	562.7	6	红富士	地布覆盖
3	白水	2017	562.7	6	红富士	秸秆覆盖
4	子洲	2018	615.8	8	蜜脆	充分供水
5	子洲	2018	615.8	8	蜜脆	轻度亏缺
6	子洲	2018	615.8	8	蜜脆	重度亏缺

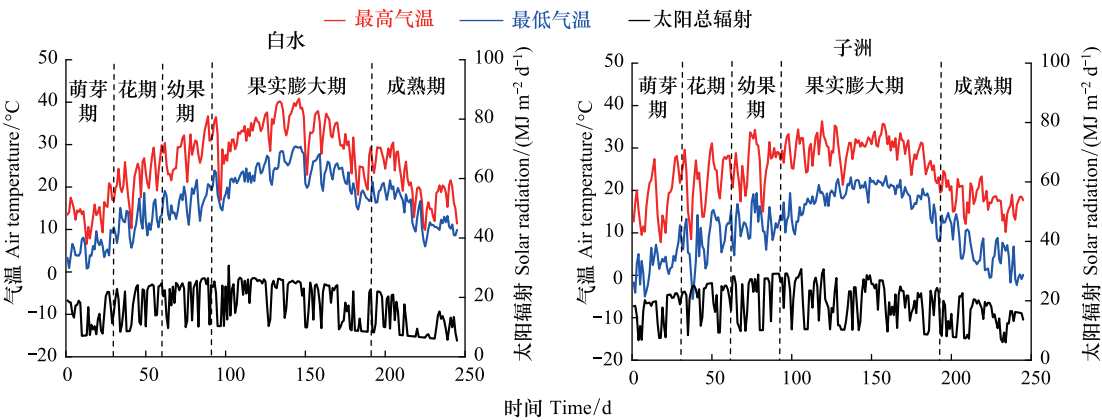


图 1 各试验地苹果园生育期内逐日气温和太阳总辐射量

Fig.1 Daily temperature and total solar radiation during the growth period of apple orchards in each experimental site

1.2 测定项目

1.2.1 土壤水分

土壤含水量测定采用管式 TDR 系统(TRIME-IPH, IMKO, 德国), TDR 测管分别位于果树株间、树冠外围距主干 50 cm 处及果树行间, 10 d 或者 15 d 监测 1 次, 雨后加测, 测量深度为 100 cm, 深度间隔 20 cm, 共

5 层,其中白水共测定 24 次,子洲共测定 17 次。

1.2.2 蒸发蒸腾

采用水量平衡方程计算每月总的蒸发蒸腾量,结合土壤水分测定情况,白水样本量共计 6 个,子洲样本量共计 5 个。果树耗水量:

$$ET = P - \Delta W \quad (1)$$

式中, ET 为果树耗水量(mm); P 为有效降雨量(mm); ΔW 为月初与月末土壤贮水量的差值(mm)。

1.2.3 土壤硝态氮

用土钻在距离树干 50 cm 处沿着“S”型曲线(五点法)采样,采集 100 cm 剖面的土壤样品,间隔 20 cm,每个处理共采集 100 个土样,所取土样带回实验室经过风干、研磨,过 2 mm 筛,再用紫外分光光度法测定硝态氮。

1.2.4 产量和平均单果重

果实成熟期称量每株树的苹果重量,每个处理共选取 12 株果树,然后统计每个处理苹果个数和产量。每个处理的总重量除以总个数为平均单果重。

1.2.5 N_2O 和土壤碳流失

查阅苹果园的温室气体排放和土壤呼吸的研究文献,同时借鉴相关研究的 meta-analysis^[21] 结果,对 3 个处理的模拟指标进行验证。

1.3 研究方法

1.3.1 STICS 模型

STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard) 模型是于 1996 年由法国农业科学研究院建立的通过逐日气象数据驱动的土壤作物机理性模型^[18],能够模拟多年生木本作物的水碳氮平衡过程^[22]。该模型在叶片表面发育的基础上描述了作物的生长,叶片表面能够拦截光并将其转化为生物量,这些生物量通过源汇法分配给根、果实、叶子和茎。树木的物候期和关键变量日期是用来模拟作物果树生长的基础^[19]。

1.3.2 STICS 模型对苹果园的参数化

由于 STICS 模型现有版本不包括苹果,因此首先应当对其进行参数化。本文主要包括 3 种方法:1) 试验地直接测量的参数,例如最大株高和两个物候期之间的积温。2) 例如生长的最优温度和限制温度的参数可以从苹果树的参考文献中可以获得。3) 使用试验数据、模型参数曲线和全局参数化估计。此目的是为了获得完整的一套模型苹果参数,这些参数对于该模型运用到新作物来说是最敏感和最重要的^[23],经模型率定后的主要参数如表 2。

1.3.3 模型评估

本研究选取清耕和充分灌溉处理的相关数据进行校正,其余处理相关数据进行验证,同时对模拟值和实测值进行分析对比,采用相对平均偏差(MD)、相对均方根误差(RRMSE)和模拟精度(EF)评估模型模拟效果:

$$MD = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\bar{O}} \quad (2)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\bar{O}} \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

式中, n 是观测值的个数, P_i 是模拟值, O_i 是观测值, $\bar{O}$ 是观测值的平均值。

表 2 主要的苹果园 STICS 模型参数意义和取值

Table 2 The significance and value of main apple orchard STICS model parameters

参数 Parameters	单位 Unit	取值 Values
地上的枯叶比例 Senescent leaf proportion falling on the soil	无量纲	1.0
行间作物竞争参数 Interplant competition parameter	无量纲	-0.5
关键氮稀释曲线参数 Parameter of the critical curve of nitrogen requirements	N%	2.32
每积温内果实生长的最大数量 Potential number of fruits in per degree day	℃/d	0.025
行间作物开始竞争时的最小密度 Minimal density when interplant competition starts	m ⁻²	0.1
LAI 最大生长速率 Maximum rate of LAI	m ² /P/(℃·d)	0.1
消光系数 Extinction coefficient	无量纲	0.5
氮稀释发生时的地上生物量 Aboveground dry matter of nitrogen	t/hm ²	1.0
果实最大干重 Maximum fruit weight	g	80
每天可变动的碳储存的比例 Maximal proportion of carbon reserve remobilizable daily	无量纲	0.1
允许果实开始生长的最小源/汇值 Minimal sources/sinks value allowing the trophic stress fruit onset	无量纲	0.56
叶片生长最小的源/汇比例值 Minimal value of ratio source/sink for the leaf growth	无量纲	0.48
萌芽期到叶片生长最快期所需积温 Cumulative thermal between emergence and leaf growth	℃·d	30
萌芽期到果实生长开始时所需积温 Cumulative thermal between emergence and fruit growth	℃·d	180
开花期到果实生长开始时所需积温 Cumulative thermal between flower and fruit growth	℃·d	100
果实开始生长到果实水分变化时所需积温 Cumulative thermal between fruit growth and water change	℃·d	1000

1.4 生态系统服务指标、生态系统功能指标和综合评价

每类生态系统服务能被一个或者几个指标来描述(表 3),土壤氮可利用性指标为平均土壤硝态氮浓度;气候调节指标主要考虑温室气体 N₂O 排放,是一个负面影响^[10],也考虑土壤和树体的碳固存量;水循环调节指标为平均土壤含水量和生育期内总的蒸发蒸腾量;果实生产指标为产量和平均单果重。

影响生态系统服务的生态系统功能指标如表 4 所示:因为氮矿化能够影响土壤氮可利用能力,所以相应的功能指标是累积矿化氮数量;用土壤累积腐殖碳数量描述为土壤碳固存,使用叶片、果实和茎中的平均碳含量当做净初级生产力和最大地上生物量;在树体的生长发育过程中,水分亏缺和氮素亏缺会对果树生产有影响;氮吸收的功能指标是一年生器官吸收的最大氮数量。

使用服务标准值 S 表达每个生态系统服务的大小, S 计算公式如下:

$$S = \frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \tag{5}$$

式中, s 是果园生态系统服务值 $s_{\min}$, $s_{\max}$ 分别是果园生态系统中最小和最大的服务值。标准值 S 在 0 到 1 之间变化。

用平均标准值 $\bar{S}$ 和雷达图综合评价果园生态系统服务概况,其中 值越大表示该果园服务能力越强。

表 3 果园生态系统服务指标和单位

Table 3 Orchard ecosystem service indicators and units

服务 Service	指标 Indicator	单位 Unit
土壤氮可利用能力 Soil nitrogen availability	0—20 cm 土壤硝态氮浓度	mg/kg
气候调节 Climate regulation	N ₂ O 排放量	kg N hm ⁻² a ⁻¹
	总固碳量	kg C hm ⁻² a ⁻¹
水循环调节 Water cycle regulation	0—20 cm 土壤平均含水量	% 土壤干质量
	0—20 cm 土壤平均储水量	mm
	生育期内总的蒸发蒸腾量	mm
果实生产 Fruit production	产量	t hm ⁻²
	平均单果重	g/个

表 4 果园生态系统功能指标和单位

Table 4 Orchard ecosystem function indicators and units

功能 Function	指标 Indicator	单位 Unit
矿化 Mineralization	氮矿化数量	kg N hm ⁻² a ⁻¹
腐殖 Humification	土壤固碳变化量	kg C hm ⁻² a ⁻¹
碳固定 Carbon sequestration	树体年度器官固定的碳(果实, 叶子, 茎)	kg C hm ⁻² a ⁻¹
果实生产水分利用 Water use for fruit production	平均气孔水分充足指数(在 0—重度水分 水分亏缺和 1—无水分亏缺之间变化)	无量纲
氮营养 Nitrogen nutrition	氮营养指数(在 0—重度氮亏缺和 1—无氮亏缺之间变化)	无量纲
氮吸收 Nitrogen absorption	年度器官吸收的最大氮数量	kg N hm ⁻² a ⁻¹
挂果 Fruit set	每棵树果实数量	个
碳分配 Carbon allocation	收获时果实碳数量	kg C hm ⁻² a ⁻¹

2 结果与分析

2.1 模型评估

由图 2 和表 5 可以看出:产量和单果重 RRMSE 低于 15% 以及 EF 接近 0, 产量和单果重模拟效果较好, 但子洲果园产量模拟值存在低估现象, 同时所有果园单果重模拟值都存在低估现象, 尤其是秸秆覆盖和充分灌溉的果园。随着添加覆盖措施和增大灌水量, 产量和单果重均增大。果园土壤含水率 RRMSE 和 EF 分别在 15% 和 -0.6 左右, 土壤水分模拟效果较好, 且较好的模拟出土壤水分的短暂性变化。旱作果园模拟效果优于灌溉果园, 其中白水果园土壤水分平均模拟值与平均实测值较接近, 子洲果园土壤水分平均模拟值低于平均实测值。但萌芽期和花期模拟效果均较差, 模拟值存在严重的低估现象; 模型对降雨的响应比较敏感, 能迅速模拟出水分的动态变化, 受后期几次降雨和灌溉的影响, 土壤水分模拟效果变优, 模拟值与实测值吻合程度较好。果园各月蒸发蒸腾 RRMSE 为 27%, 在一定误差范围内, 而且大部分情况下蒸发蒸腾量模拟值存在低估现象, 尤其是在 6—8 月, 其中灌溉果园的蒸发蒸腾量模拟效果优于旱作果园。综上, STICS 模型均能较好的模拟苹果园产量、单果重、土壤水分和蒸发蒸腾。

2.2 苹果园生态系统服务分析

本研究从氮营养平衡和水文循环来分析苹果园生态系统服务, 即与水、碳、氮相关的服务:

(1) 与氮循环相关的服务: 秸秆覆盖的果园氮吸收和土壤硝态氮浓度高于其他果园(表 6, 表 7), 同时土壤保水能力较低; 硝态氮和含水量分别与氮矿化和土壤碳固定正相关和负相关(图 3), 硝态氮与含水量负相关(图 4)。氮矿化和土壤碳固定主要由土壤水分饱和度和影响(图 5)。施肥、灌溉和覆盖能够影响氮矿化能力(图 5)。N₂O 与土壤硝态氮负相关(图 4)。

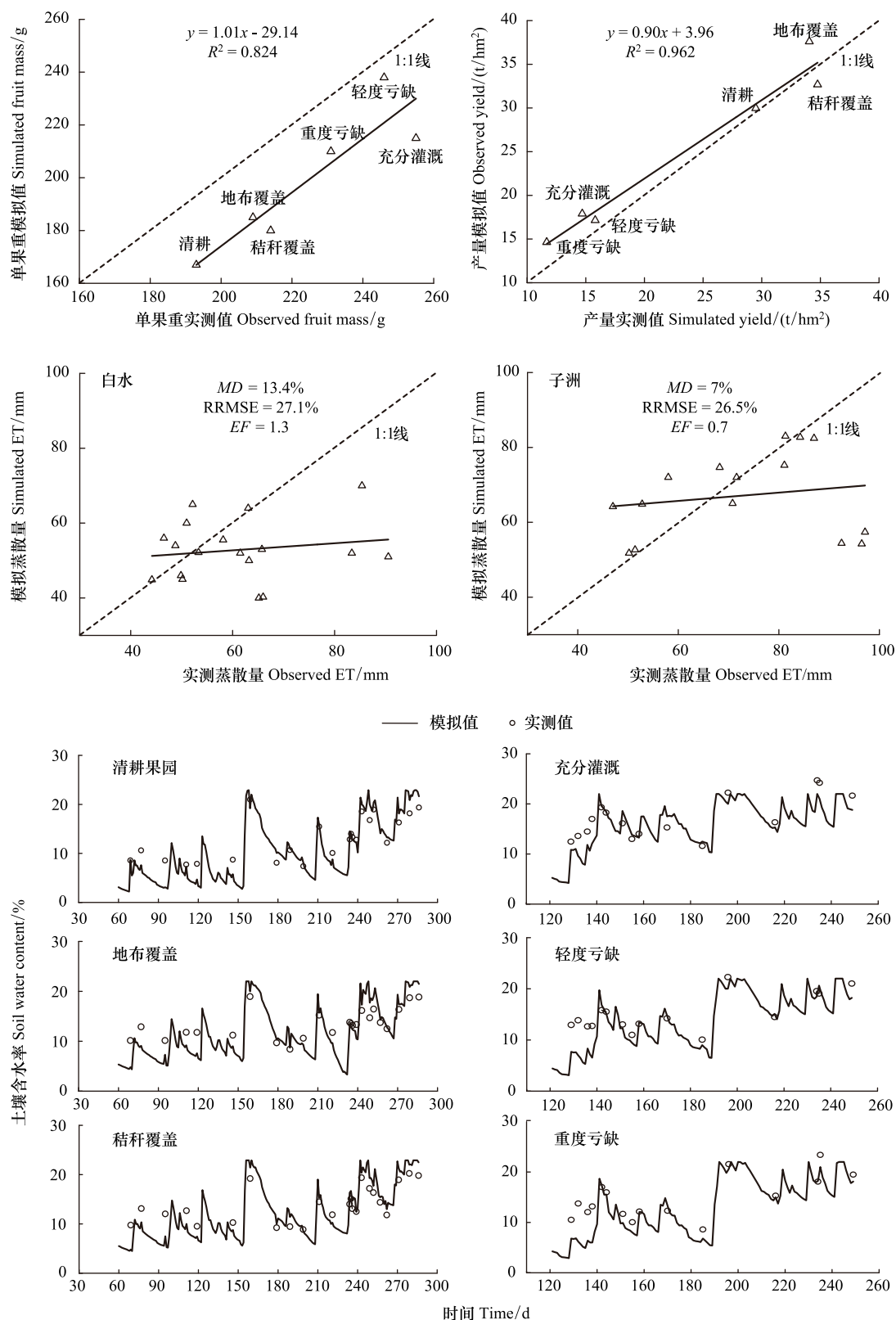


图2 各果园产量、单果重、土壤含水量以及蒸散量模拟值和实测值对比

Fig.2 Comparison of simulated and measured values of yield, fruit mass, soil water content, and evapotranspiration in each orchard

MD: 相对平均偏差 Mean deviation; RRMSE: 相对均方根误差 Relative root mean squared error; EF: 模拟精度 Water efficiency; ET: 蒸散量 Evapotranspiration

表 5 STICS 模型对产量、单果重、土壤含水量和蒸散量的模拟效果评估

Table 5 Evaluation of simulation effect of STICS model on yield, fruit mass, soil water content, and evapotranspiration				
地点 Location	指标 Indicator	MD/%	RRMSE/%	EF
白水	产量	-2.0	7.3	0.1
	单果重	13.6	13.8	-8.0
	土壤水分	1.0	16.1	-0.6
	ET	13.4	27.1	-0.3
子洲	产量	-13.0	13.7	0.2
	单果重	9.4	10.8	-5.2
	土壤水分	7.3	13.9	-0.6
	ET	7.0	26.5	0.3

MD:相对平均偏差 Mean deviation; RRMSE:相对均方根误差 Relative root mean squared error; EF:模拟精度 Water efficiency

表 6 STICS 模型果园生态系统功能指标模拟值

Table 6 Value of ecosystem function indicators simulated by the STICS model in apple orchard								
苹果园生态系统 Apple ecosystem	氮矿化 N mineralized/ (kg N hm ⁻² a ⁻¹)	土壤固碳 Soil C sequece/ (kg C hm ⁻² a ⁻¹)	氮吸收 N absorption/ (kg N hm ⁻² a ⁻¹)	树体固碳 Soil C sequence/ (kg C hm ⁻² a ⁻¹)	氮营养指数 Nitrogen nutrition index	水分充足指数 Water sufficiency index	单株果实数 Fruit number per tree	果实碳数量 Fruit C quantity/ (kg C hm ⁻² a ⁻¹)
1	125	-1320	62	7050	0.99	0.97	72	4970
2	276	-2454	100	11280	1.00	1.00	80	8100
3	214	-2168	96	10220	1.00	0.99	72	7004
4	312	-2955	46	6980	0.99	1.00	56	4060
5	242	-2292	45	6450	0.99	1.00	49	3870
6	218	-1320	41	5670	0.98	0.98	49	3310

表 7 STICS 模型果园生态系统服务指标模拟值

Table 7 Value of ecosystem service indicators simulated by the STICS model in apple orchard								
苹果园生态系统 Apple ecosystem	土壤硝态氮 Soil nitrate/ (mg/kg)	氧化亚氮 Nitrous oxide/ (kg N hm ⁻² a ⁻¹)	总固碳量 Total C sequence/ (kg C hm ⁻² a ⁻¹)	平均含水率 Mean soil water content/%	储水量 Storage water/mm	蒸发蒸腾 Evapotranspiration/ mm	产量 Yield/ (t/hm ²)	单果重 Fruit mass/g
1	12.96	1.49	5730	13.00	35.10	341.62	29.97	167
2	16.67	1.11	8826	12.95	34.97	366.47	37.61	185
3	18.52	1.76	8052	14.07	37.99	346.32	32.68	180
4	13.33	1.52	4025	15.80	37.92	393.06	17.90	215
5	17.14	1.28	4158	13.32	31.97	387.13	17.15	238
6	17.32	1.19	4350	12.57	30.17	379.72	14.64	210

(2)与碳循环相关的服务:在极端气候事件下子洲的产量降到 14.64 t/hm²(表 7),产量与树体碳固定和果树碳数量正相关(图 4);总固碳量与氮吸收正相关(图 3),总固碳量取决于树体固碳数量,而果树的叶片、茎、果实发育取决于氮吸收;子洲单果重较大,果实数较少(表 7)。果实数与单果重负相关(图 4)。子洲果园产量和总固碳量较低(表 7)。

(3)与水循环相关的服务:子洲充分灌溉的果园土壤水分高于其他果园(表 7)。含水量与 N₂O 正相关(图 4)。蒸发蒸腾与产量的关系不显著(通常是二次曲线关系),但是与总固碳负相关(图 4)。叶片水分充足指数与蒸发蒸腾正相关(图 3)。

2.3 苹果园生态系统服务概况

农业管理措施和气候对果园生态系统服务概况影响较为显著。不同灌水量对灌溉果园生态系统服务概况影响较大。灌溉能够增加产量、单果重和土壤水分;灌水量越大,N₂O 排放量越大。充分灌溉的果园服务能

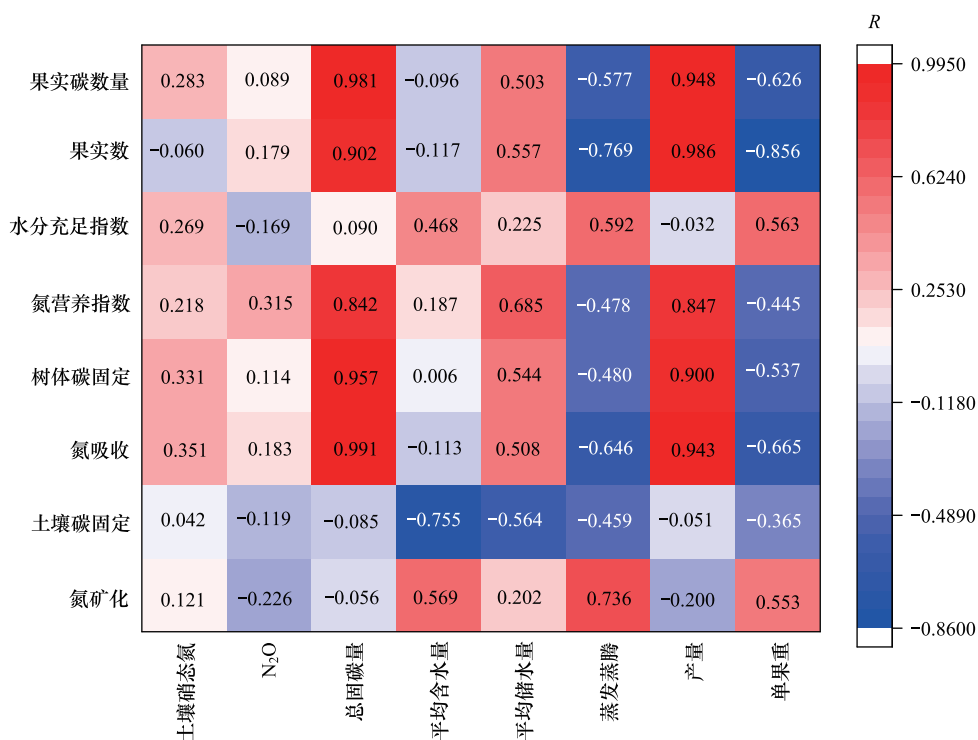


图3 果园生态系统功能与生态系统服务之间的关系

Fig.3 Relationship between orchard ecosystem functions and ecosystem services

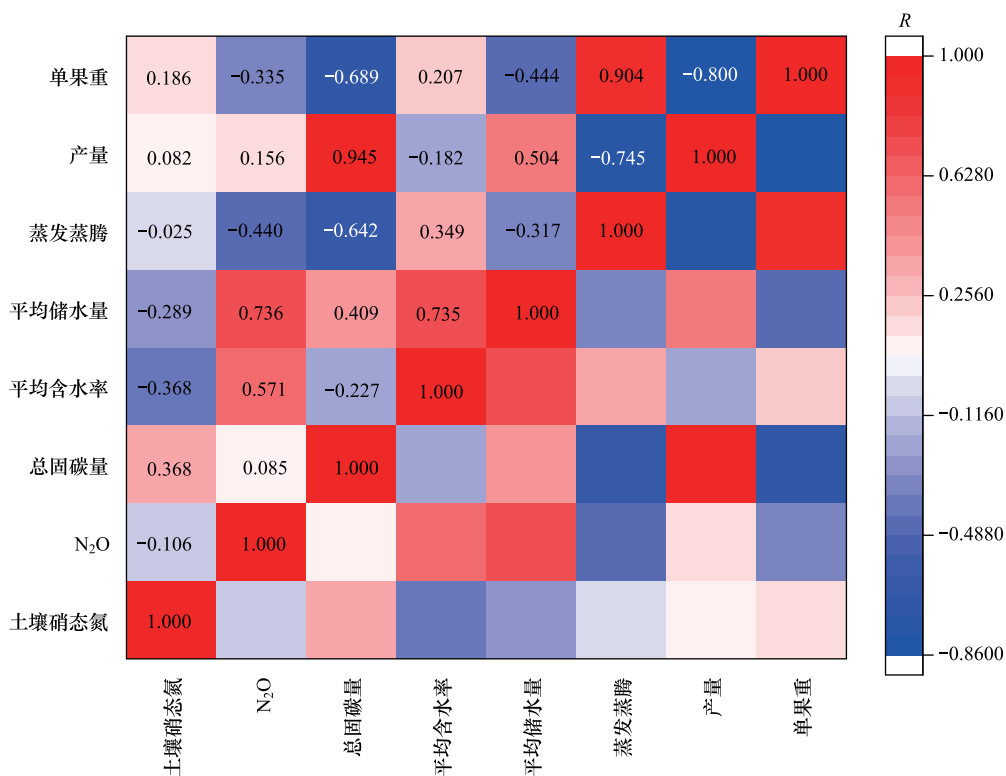


图4 果园生态系统服务协同关系和权衡关系

Fig.4 Orchard ecosystem service synergy and trade-off

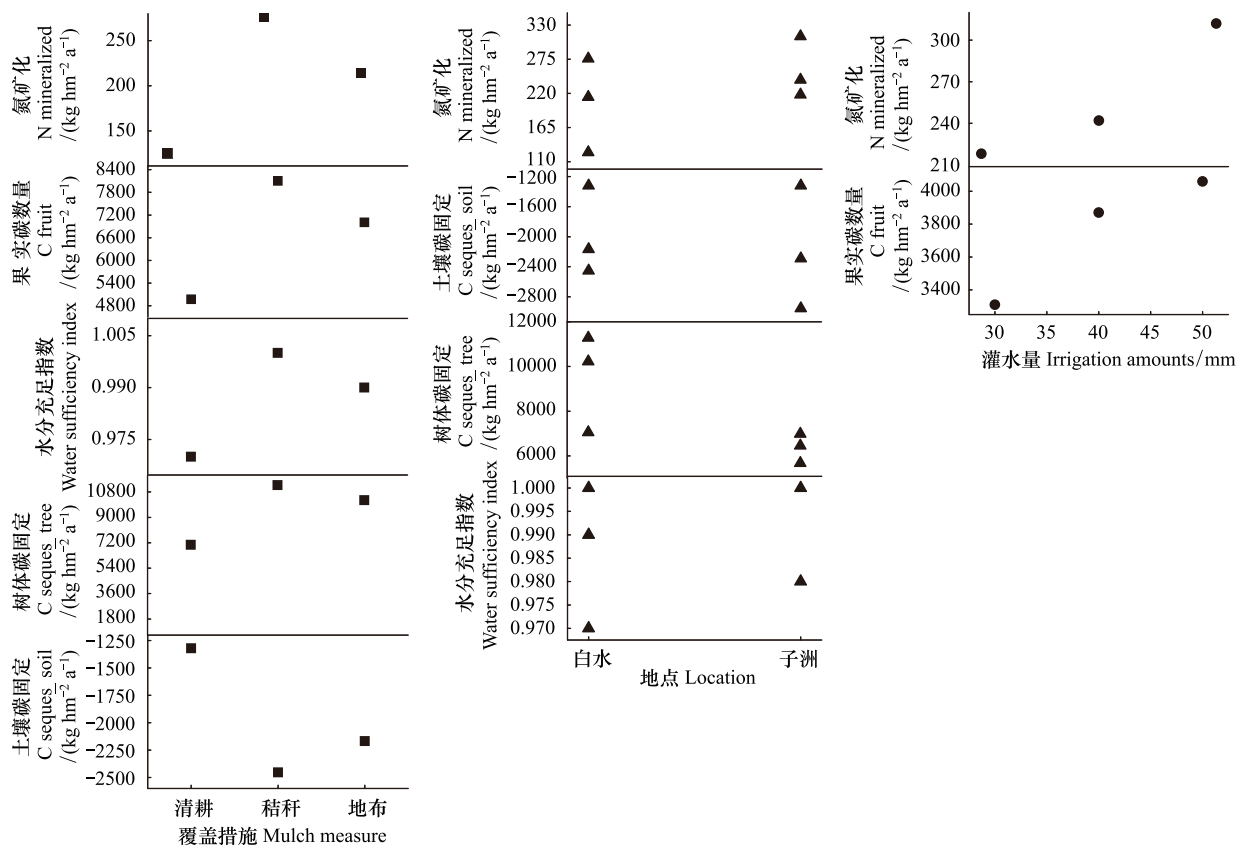


图 5 气候和农业管理措施对与生态系统服务较相关的生态系统功能的影响

Fig.5 Impact of climate and agricultural management on ecosystem functions that are more relevant to ecosystem services

力较强,但服务概况与重度亏缺灌溉的果园相反,有着较大的蒸发蒸腾、土壤水分和 N_2O 排放量。覆盖可以提高果实产量、品质和土壤含水量,但增加了 N_2O 排放(表 7,图 6)。地布覆盖的果园服务概况与清耕果园相反(图 6),产量、单果重和土壤水分较大,但是 N_2O 排放量较小。秸秆覆盖的果园服务概况与地布覆盖的果园比较相似(图 6),都有着较大的产量、单果重、土壤水分和总固碳量。

对于每个果园的平均服务标准值 $\bar{S}$,秸秆覆盖(0.67)>地布覆盖(0.52)>清耕(0.30),充分灌溉(0.56)>轻度亏缺灌溉(0.44)>重度亏缺灌溉(0.30),秸秆覆盖和充分灌溉果园的 $\bar{S}$ 最大,即综合服务能力最强;但是考虑到温室气体的负面影响,对其进行综合分析得出,地布覆盖和轻度亏缺灌溉的果园生态系统服务概况最相似且较为平衡,产量、单果重、土壤水分和养分较大, N_2O 排放较小,故地布覆盖和轻度亏缺灌溉的果园生态系统是较理想的果园。

3 讨论

3.1 STICS 模型在苹果园可持续生产中的应用

苹果园在保证最大生产力的同时应适当考虑改善环境和保护自然资源,从而实现苹果园可持续发展。使用 STICS 模型可以评估苹果园生态系统服务指标和量化苹果园生态系统服务概况,所以该模型可较好地用于指导苹果园可持续生产。

基于 STICS 模型估算和表征苹果园各项生态系统服务的结果还存在一定差异。子洲苹果园产量模拟值出现低估现象是因为三月份的一次极端气候事件导致减产,而 STICS 模型不能对此事件进行模拟造成的;但所有苹果园单果重模拟值存在低估现象,分析其原因主要与模型中设置统一的苹果品种参数,而试验中苹果品种不一致关系密切。旱作果园的土壤水分模拟效果优于灌溉果园主要是因为该模型对降雨和灌溉比较敏

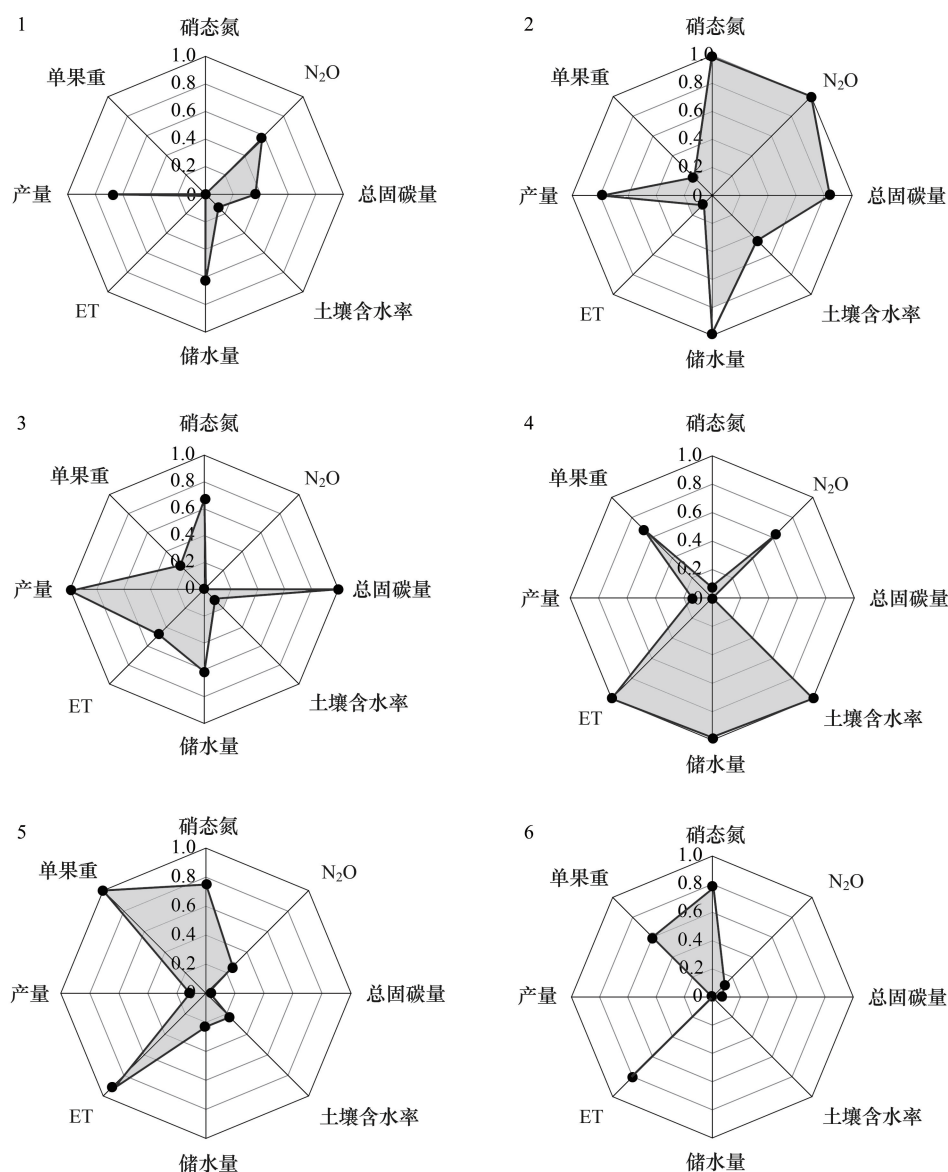


图6 果园生态系统在雷达图上的服务概况

Fig.6 The service profile of the orchard ecosystem on the radar chart

感,土壤水分受到灌溉措施的波动引起的;蒸散量模拟值偏低的原因与该模型不能精确的对苹果生育期进行模拟,导致叶面积指数等参数与实际差距较大有很大的关系。土壤硝态氮模拟值与实测值较为接近,这与Jing等^[24]的研究结果一致;但是 N_2O 排放模拟值偏高,主要是因为本研究中施肥浓度高于meta-analysis^[21]中的浓度(平均施肥量 104 kgN/m^2),而施肥对 N_2O 排放影响较大造成的。树体碳固定模拟值高于Zanotelli等^[25]的研究结果,偏高主要是因为本研究中考虑了苹果园地上一年生木材生产中的碳固定造成的;土壤碳流失模拟值低于Montanaro等^[26]的研究结果,偏低的原因是没有考虑与根际呼吸有关的土壤碳损失量,而土壤碳损失量与土壤、气候和管理措施有密切关系。

本研究使用STICS模型量化苹果园生态系统服务概况,在对比这些苹果园生态系统服务概况后得出,地布覆盖和轻度亏缺灌溉的苹果园服务能力最强,原因是这两种管理措施高效地增强了各项生态系统服务功能;然而,从苹果园生产和生态两方面综合考虑,地布覆盖和轻度亏缺灌溉的苹果园是最理想的,原因主要有两点:(1)这两个苹果园生产力较强,而且产生的温室气体负面影响较小;(2)这两个苹果园的生态系统服务

协同作用的正面效应较大,权衡作用的负面效应较小,使得生态系统服务效益最大化^[27]。因此,权衡苹果园生态过程,经济和生态效益,充分发挥苹果园关键主体之间的协作关系是实现苹果园可持续生产的关键所在。

3.2 气候和农业管理措施对苹果园生态系统服务的影响

新兴的可持续农业,则希望将自然过程协调和人为调控融合,建立近自然的高效的现代农业体系^[28]。对于苹果园,气候和农业管理措施分别是自然调控和人为调控因子,因此,研究气候和农业管理措施对苹果园生态系统服务的影响对实现苹果园可持续生产具有重要意义。

子洲地区 2018 年是个歉收年(“off-crop”年),这会引来一些果园生态系统服务的供应能力减弱,主要体现在果树生产以及固碳和反硝化两方面。由于“off-crop”情景下树体对氮素的需求会减少,氮素不断积累在土壤中,导致土壤硝态氮浓度变大。“off-crop”情景的出现可能是很多因素造成的,例如在弱光^[29]、低温^[30]以及作物负载或荷尔蒙作用下导致分化花蕾数量的减少,因此产量会受到影响。结合当地实际情况,很可能是因为三月份的一次倒春寒事件引起的,但是目前没有模型能够对该事件进行模拟。

覆盖措施对苹果园生态系统服务有着较显著的影响。一方面,因为覆盖可以改善土壤结构和减少土壤无效蒸发,提高保水效果,同时增加树体增长量,促进果树发育,所以能提高产量和果实品质^[31];另一方面,因为覆盖对土壤水分和温度有显著影响,然而土壤水分和温度是影响 N_2O 产生、传输和排放的主要因子,所以覆盖必将对土壤 N_2O 通量产生深刻的影响^[32]。因为生育期内适当的灌溉可以弥补对土壤水分的消耗,利于果实有机物积累,进而提高果树产量和品质。本研究中灌溉虽然提高了果实产量和品质^[33],但是由于灌水量较少,达不到显著提高土壤氮素的要求;同时,所有灌溉系统都是按照果树水分需求设置的,虽然存在重度水分亏缺处理,但对模拟结果影响较小。

从所有果园生态系统在 2 和 3 范围内和离理想化的距离可以看出农业管理措施能缓和供应服务与调节服务之间的权衡作用(图 7),因为人为管理措施是可以改变相互竞争服务对的一个生态系统服务指标,导致竞争作用发生了改变^[34]。地布覆盖和轻度亏缺灌溉的果园生态系统有着最短的距离,而此距离代表着权衡作用的程度,所以地布覆盖和中度水分亏缺灌溉能够最佳地优化权衡作用,一定程度上使得综合效益最大化。

4 结论

本研究利用 STICS 模型对黄土高原苹果园生态系统服务进行分析和评估,得出结论如下:(1)STICS 模型较好地解决了苹果园生态系统功能的复杂性难题,同时把农业管理措施、生态系统功能及生态系统服务紧密地联系在一起,而且通过 STICS 模型分析生态系统服务的方法是较有前景的。(2)农业管理措施对果园生态系统服务概况影响较显著,是果园生态系统服务强有力的驱动因子,其中地布覆盖和中度亏缺灌溉的果园生态系统服务概况较相似且最平衡,是较理想的果园;(3)除了固碳与产量、单果重或者果树相关指标是协同作用,其他生态系统服务都是权衡作用;(4)农业管理措施优化了权衡作用,减轻了农业生产与调节服务之间的矛盾,地布覆盖和中度水分亏缺灌溉最佳地缓和了权衡作用。

参考文献(References):

- [1] Wang S F, An J, Zhao X N Gao X D, Wu P T, Huo G P, Robinaon B H. Age- and climate- related water use patterns of apple trees on China's

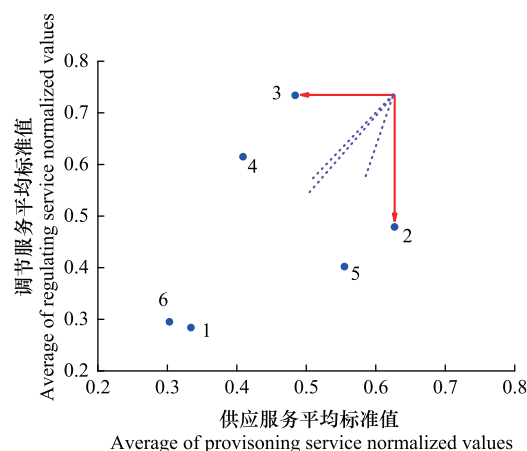


图 7 供应服务与调节服务之间的权衡作用

Fig.7 The trade-off between support service and regulation service

每个点代表每个果园系统,红色线代表供应服务和调节服务的最高值,点划线代表离理想情景下的距离

- Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 2019, 582:124462.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [3] Yang L, Zhang H D, Chen L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(3): 292-301.
- [4] Power M. The planetary piggy bank. *Nature*, 1997, 388(6642): 529-530.
- [5] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hammon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [6] 黄艳章, 信忠保. 不同生态恢复模式对黄土残塬沟壑区深层土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2020, 40(3): 778-788.
- [7] Demestihis C, Plénet D, Génard M, Raynal C, Lescourret F. Ecosystem services in orchards. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(2): 12.
- [8] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [9] Swinton S M, Lupi F, Robertson G P, Hamilton S K. Ecosystem services and agriculture: cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 245-252.
- [10] 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.
- [11] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [12] 李婷, 吕一河. 生态系统服务建模技术研究进展. *生态学报*, 2018, 38(15): 5287-5296.
- [13] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [14] 刘静萍, 徐皆保. 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.
- [15] 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.
- [16] Stöckle C O, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 289-307.
- [17] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [18] Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy M H, Ruget F, Nicoulaud B, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plénet D, Cellier P, Machet J M, Meynard J M, Delécolle R. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 1998, 18(5/6): 311-346.
- [19] Demestihis C, Plénet D, Génard M, Garcia De Cortazar-Atauri I, Launay M, Ripoche D, Beaudoin N, Simon S, Charreyron M, Raynal C, Lescourret F. Analyzing ecosystem services in apple orchards using the STICS model. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94: 108-119.
- [20] Demestihis C, Plénet D, Génard M, Raynal C, Lescourret F. A simulation study of synergies and tradeoffs between multiple ecosystem services in apple orchards. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236: 1-16.
- [21] Cayuela M L, Aguilera E, Sanz-Cobena A, Adams D C, Abalos D, Barton L, Ryals R, Silver W L, Alfaro M A, Pappa V A, Smith P, Garnier J, Billen G, Bouwman L, Bondeau A, Lassaletta L. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238: 25-35.
- [22] Coucheney E, Buis S, Launay M, Constantin J, Mary B, García De Cortázar-Atauri I, Ripoche D, Beaudoin N, Ruget F, Andrianarisoa K S, Le Bas C, Justes E, Léonard J. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 64: 177-190.
- [23] Varella H, Guérif M, Buis S. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: the case of soil parameters and a crop model. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(3): 310-319.
- [24] Jing Q, Jégo G, Bélanger G, Chantigny M H, Rochette P. Simulation of water and nitrogen balances in a perennial forage system using the STICS model. *Field Crops Research*, 2017, 201: 10-18.
- [25] Zanutelli D, Montagnani L, Manca P, Scandellari F, Tagliavini M. Net ecosystem carbon balance of an apple orchard. *European Journal of Agronomy*, 2015, 63: 97-104.
- [26] Montanaro G, Tuzio A C, Xylogiannis E, Kolimenakis A, Dichio B. Carbon budget in a Mediterranean peach orchard under different management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238: 104-113.
- [27] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [28] 张卫信, 申智锋, 邵元虎, 时雷雷, 刘胜杰, 史楠楠, 傅声雷. 土壤生物与可持续农业研究进展. *生态学报*, 2020, 40(10): 3183-3206.
- [29] Beers E H, Suckling D M, Prokopy R J, Avilla J. Ecology and management of apple arthropod pests//Ferree D C, Warrington I J, eds. *Apples: Botany, Production and Uses*. Wallingford: CABI Publishing, 2003: 195-216.
- [30] Koutinas N, Pepelyankov G, Lichev V. Flower Induction and Flower Bud Development in Apple and Sweet Cherry. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2010, 24(1): 1549-1558.
- [31] 沈鹏飞, 王威雁, 李彤, 廖允成, 李亚君, 温晓霞. 陕西洛川苹果园不同覆盖措施对土壤性质、细菌群落及果实产量和品质的影响. *园艺学报*, 2019, 46(5): 817-831.
- [32] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响. *环境科学*, 2018, 39(11): 5246-5256.
- [33] 田歌, 李慧峰, 朱占玲, 陈倩, 任饴华, 葛顺峰, 姜远茂. 不同位置滴灌施氮对苹果氮素利用及果实产量和品质的影响. *中国果树*, 2020, (1): 22-26.
- [34] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.