

我国不同气候区油用牡丹生态系统服务价值评估

郭姣姣^{1,2}, 刘政安¹, 周继华¹, 来利明¹, 岳艳鹏^{1,2}, 杨刚刚^{1,2}, 郝海霞^{1,2}, 郑元润^{1*}

(1. 中国科学院植物研究所北方资源植物重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 油用牡丹是重要的木本油料植物, 但以往主要关注其经济价值, 缺乏对其生态系统生态服务功能的认识。基于野外观察数据, 采用单位服务功能价格法, 从水源涵养、土壤保持、防风固土、固碳释氧、净化环境和生物多样性保护等方面, 对不同气候区和地形条件下的油用牡丹生态系统服务价值进行评估, 并与自然草地生态系统进行比较。结果表明, 油用牡丹生态系统平均固碳释氧价值显著低于自然草地, 其他平均服务价值在油用牡丹和草地之间无显著差异; 佳县油用牡丹生态系统土壤保持价值和防风固土价值低于自然草地, 洛宁县油用牡丹生态系统土壤保持价值和防风固土价值高于自然草地, 建昌县油用牡丹生态系统土壤保持价值高于自然草地。结果有助于在综合考虑气候特征、地形条件等因素的基础上, 权衡油用牡丹生态系统经济价值和生态服务价值, 合理安排油用牡丹种植和管理措施, 为促进油用牡丹产业的可持续发展提供理论依据。

关键词 油用牡丹生态系统; 生态效益; 服务功能评估; 价值估算

中图分类号 X 826 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)04-0061-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.04.015



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Assessment of the Oil Tree Peony Ecosystem Services Value in Different Climate Regions of China

GUO Jiao-jiao^{1,2}, LIU Zheng-an¹, ZHOU Ji-hua¹ et al (1. Key Laboratory of Plant Resources, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Oil tree peony is one of the important resource plants which can produce oil. However, the economic value of oil tree peony ecosystem was well considered, its ecological values were less understood. Based on the field observation data, the ecosystem services value of the oil tree peony and grassland in different climate regions and terrains were quantitatively assessed by six functional evaluation indexes of water conservation, wind erosion prevention, soil retention, carbon sequestration and oxygen release, environment purification, and biodiversity conservation. The results showed that the average value of the carbon fixation and oxygen release was significantly higher in oil tree peony ecosystem than that in natural grassland ecosystem, and no significant difference for other average service values between oil tree peony ecosystem and natural grassland ecosystem. However, the service values of wind erosion prevention and soil conservation of the oil peony ecosystem in Jiaxian County were lower than that of natural grassland, while the values were higher in Luoning County than that in natural grassland. And the service values of soil conservation of the oil peony ecosystem in Jianchang County was higher than that of natural grassland. The results in this research are useful for tradeoff between economic and ecosystem service values of the oil tree peony ecosystem based on the climate and terrain conditions, and for arranging the planting and management for the oil peony. The results also could provide a theoretical basis for the sustainable development of the oil tree peony industry.

Key words Oil tree peony ecosystem; Ecological benefits; Function evaluation; Value estimation

生态系统服务是指生态系统为人类生存和发展所提供的自然本底条件和功能^[1], 包括有形物质产品和无形服务两方面, 可分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[2]。生态系统服务的可持续供给是社会经济可持续发展的基础, 对人类的生计和福祉至关重要^[3]。然而, 近几十年来, 由于气候变化和人类对资源需求的增加, 对生态系统造成巨大压力^[4]。全球约 60% 的生态系统服务处于退化之中^[5], 其主因是对生态系统服务功能认识不足, 导致对生态系统的不合理和过度利用。因而, 开展生态系统服务功能评估有助于科学认识生态系统的生态服务价值, 对于区域可持续发展和生态环境建设具有重要意义。

自 1997 年 Costanza 等^[2]开展全球生态系统服务研究以来, 生态系统服务得到学者的广泛关注^[6-7]。国内外学者从生态系统服务功能评估、价值核算、生态系统服务间的关系、生态系统服务变化及驱动机制等方面开展了大量研究, 对森

林^[8]、草地^[9]、湿地^[10]、灌丛^[11]、农田^[12]、果园^[13]等主要自然与人工生态系统开展了系统研究, 尤其在生态系统服务功能评估及价值核算等方面取得较大进展, 发展了众多评估方法, 主要包括单位面积价值当量因子法和单位服务功能价格法^[14]两类。当量因子法主要考虑区域或更大尺度, 评估精度较低^[15]。单位服务功能价格法先计算各项服务功能的物质量, 再依据经济学原理和方法计算价值量, 评估精度较高, 因而受到诸多学者的青睐^[16]。如刘胜涛等^[17]和宁虎森等^[18]利用单位服务功能价格法分别对泰山森林和新疆柽柳林的生态系统服务功能进行评估, 为管理决策提供科学参考。近年来, 随着气候变化和人类活动的加剧, 生态系统服务正在发生快速变化, 研究生态系统服务变化及驱动因素成为热点问题^[19]。研究表明, 气候和地形条件是影响生态系统服务功能变化的重要因素^[20], 可对生态系统结构、组成和功能产生强烈影响, 进而影响生态系统服务供给水平, 尤其是温度、降水等气候因子和坡度、坡向等地形因子会对生态系统服务产生重要影响^[21-22]。尽管生态系统服务功能评估研究进展迅速, 但对于一些具有重要经济价值的人工生态系统服务功能评估仍属空白, 对于同一类型人工生态系统服务功能的区域差异关注不够。

油用牡丹是一种重要的木本油料植物。2011 年以来, 在

基金项目 中国科学院先导 A 美丽中国生态文明科技工程专项(XDA23080601)。

作者简介 郭姣姣(1997—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向: 生态系统服务评估。* 通信作者, 研究员, 博士, 从事干旱、半干旱区植被生态学与生态学模型、恢复生态学及荒漠化防治研究。

收稿日期 2022-03-05

国家相关政策的支持下,在全国大面积推广种植油用牡丹,面积近千万亩。油用牡丹适应性强,可在贫瘠和边际土地上种植,既能改善生态环境,又能兼顾农民增收和脱贫致富,成为一些地区“生态和脱贫”的双赢产业^[23]。油用牡丹产业与“美丽中国”建设提出的绿色、低碳、循环经济发展道路相契合,是繁荣地区经济和建设美丽乡村的良好选择。然而,目前在油用牡丹经营管理方面,人们仍普遍关注其经济价值和短期效益而忽略其生态效益。同时,由于自然状况、气候及地形条件的差异,不同地区油用牡丹生态系统服务功能表现出较大的空间异质性,但目前对于油用牡丹人工生态系统的生态服务价值及区域差异了解很少,制约了油用牡丹生态服务功能的发挥。该研究以分布于我国不同气候区的 3 个典型油用牡丹人工生态系统为研究对象,基于野外观察数据,采用单位面积服务功能价格法,评估不同气候和地形条件下油用牡丹生态系统服务价值,阐明油用牡丹生态系统服务功能及其影响因素,为油用牡丹产业的可持续发展,以及经济和生态效益的优化提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点为辽宁省建昌县、陕西省佳县和河南省洛宁县 3 个油用牡丹种植基地。建昌县位于辽宁省西南部,40°24′~41°06′N、119°13′~120°18′E,气候类型为温带大陆性季风气候,年均温 8.2℃,年降雨量 569.7 mm。境内山峦起伏,沟壑纵横,油用牡丹人工生态系统位于牯牛营子乡天香园生态农场,面积约 133.3 hm²,于 2015 年开始种植。佳县位于陕西省东北部,黄河中游西岸,37°41′~38°23′N、110°0′~110°45′E,气候类型为温带大陆性半干旱季风气候,年均温 10℃,年降雨量 547.7 mm。境内山丘连绵,是典型的黄土高原沟壑地貌,油用牡丹人工生态系统位于乌镇刘家山乡,面积约 66.7 hm²,于 2016 年开始种植。洛宁县位于河南省西部,洛河中游,34°05′~34°38′N、111°08′~111°49′E,气候类型为温带季风气候,年均温 13.7℃,年降雨量 659 mm,气候宜人,适宜多种农作物生长,油用牡丹人工生态系统位于罗岭乡,面积约 66.7 hm²,于 2014 年开始种植。3 个地点的油用牡丹种植模式均分为平地 and 坡地种植,人工管理措施包括灌溉和除草。

2 材料和方法

2.1 数据来源

2.1.1 野外测定。在 3 个油用牡丹种植基地,选择种植时间和株龄相近的油用牡丹群落,分别在 3 个不同地形条件(平地、阴坡和阳坡)的油用牡丹群落设立样地,以相邻的自然草本植物群落作为对照。记录样地基本状况,包括经纬度、坡度、坡向等信息。在每个牡丹群落随机设置 3 个 5 m×5 m 的样方,记录牡丹株数、高度、冠幅和盖度等,采用样株收获法^[24]测定牡丹群落生物量。在相邻的自然草本植物群落随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,记录样方内草本植物种数、高度和盖度,采用全株收获法^[24]测定群落生物量。在每一个样方内用土壤环刀在 40 cm 深度处采集 1 个土壤样品,用于测定土壤容重;采集 0~50 cm 的土壤混合样品,用于测定土

壤理化性质。采集的土壤样品带回实验室进行相关指标测定。土壤机械组成采用密度计法测定(LY/T 1225—1999);土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度计法测定(HJ 615—2011);土壤碳酸钙含量采用中和滴定法测定(LY/T 1250—1999)。

2.1.2 数据收集。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括 2014—2019 年逐年日均降水、气温、日照时数和风速等;蒸散量数据来源于 MODIS 全球蒸散发产品数据集(http://files.ntsg.umd.edu/data/NTSG_Products),包括 2014—2019 年逐年的蒸散量数据;DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);各省市统计年鉴数据来源于统计局官网。

2.2 生态系统服务功能及价值核算方法 对水源涵养、防风固土、土壤保持、固碳释氧、净化环境和生物多样性保护 6 项较为重要且得到广泛重视的生态系统服务功能进行评估^[25]。该研究中涉及对不同气候区和地形条件下油用牡丹和自然草地生态系统服务功能的比较,采用价值量进行评估。各项生态系统服务功能及价值核算方法如下:

2.2.1 水源涵养功能。生态系统能够利用林冠层、枯落物层和土壤层有效拦蓄降水,从而涵养土壤水分和补充地下水,根据水量平衡方程^[26]和影子工程法^[27]对生态系统水源涵养功能物质量和价值量进行估算,主要公式如下:

$$Q_w = (P - R - ET) \times 10 \quad (1)$$

$$V_w = Q_w \times C_w \quad (2)$$

式中, Q_w 为水源涵养量, m³/(hm²·a); P 为年降雨量, mm; R 为地表径流量, mm; ET 为年蒸散量, mm,通过 MODIS 数据获取; V_w 为水源涵养价值, 元/(hm²·a); C_w 为水库单位库容的工程造价, 元/m³,取 0.67。

2.2.2 防风固土功能。生态系统通过植被削弱风力,降低风速,此外,还通过根系防止土壤风蚀,有效阻止土地沙化,根据修正风蚀方程^[28]计算生态系统防风固土量,并采用恢复成本法^[27]计算价值量,计算公式如下:

$$Q_d = (SL_r - SL) \times 10 \quad (3)$$

$$V_d = \frac{Q_d}{\rho \cdot h} \times C_d \quad (4)$$

式中, Q_d 为防风固土量, t/(hm²·a); SL 为实际土壤侵蚀量, kg/m²; SL_r 为潜在土壤侵蚀量, kg/m²; V_d 为防风固土价值, 元/(hm²·a); ρ 为土壤容重, t/m³; h 为土壤沙化标准覆沙厚度, m,取 0.1; C_d 为治沙工程的平均成本, 元/hm²,取 2 624.67。

2.2.3 土壤保持功能。生态系统土壤保持功能主要表现为减少土壤侵蚀和减少泥沙淤积^[29]两方面,该研究根据 RULSE 模型计算土壤保持量,并采用替代成本法^[27]对其价值量进行评估,计算公式为:

$$Q_s = R \times K \times LS \times (1 - C) \quad (5)$$

$$V_1 = (Q_s \times B) / (H \times \rho \times 10\ 000) \quad (6)$$

$$V_2 = Q_s \times C_w \times \lambda / \rho \quad (7)$$

式中, Q_s 为土壤保持量, t/(hm²·a); R 为降水侵蚀力因子,

$\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$; K 为土壤可蚀性因子, $\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$; LS 为地形因子; C 为植被覆盖因子; V_1 为减少土壤侵蚀价值, 元/ $(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; V_2 为减轻泥沙淤积价值, 元/ $(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; B 为土地平均收益, 元/ hm^2 ; H 为土壤耕层厚度, m ; λ 为泥沙淤积系数, 取 0.24。土壤保持价值量 V_s 等于 V_1 与 V_2 之和。

2.2.4 固碳释氧功能。生态系统通过光合作用固定 CO_2 和释放 O_2 , 通过质量平衡方程^[27] 估算生态系统的固碳释氧量, 并采用造林成本法和工业制氧法^[29] 估算其价值量, 计算公式如下:

$$Q_c = B_c \times 1.63 \times R_c \tag{8}$$

$$Q_o = B_o \times 1.20 \tag{9}$$

$$V_c = Q_c \times C_c + Q_o \times C_o \tag{10}$$

式中, Q_c 为固碳量, $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; Q_o 为释氧量, $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; B_c 为生态系统生物量增长量, $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; R_c 为 CO_2 中含碳质量分数, %, 取 27.27%; V_c 为固碳释氧价值, 元/ $(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; C_c 为固碳成本, 元/ t , 取 753; C_o 为工业制氧成本, 元/ t , 取 376。

2.2.5 净化环境功能。植被具有吸收 SO_2 、 NO_x 、滞尘等功能, 降低大气中污染物浓度, 改善环境质量。采用替代成本法^[27] 计算生态系统吸收 SO_2 、 NO_x 、滞尘价值, 计算公式为:

$$V_a = \sum_{j=1}^3 Q_j \times C_a \tag{11}$$

式中, V_a 为生态系统吸收 SO_2 、 NO_x 及滞尘的价值, 元/ $(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; Q_j 为生态系统对污染物的单位面积净化量 ($j=1, 2, 3$ 分别表示 SO_2 、 NO_x 及滞尘), t/hm^2 , 根据生态系统类型^[30] 进行取值; C_a 为不同种类大气污染物处理成本, 元/ t 。

2.2.6 生物多样性保护功能。基于当量因子法^[31] 评估生态

系统的生物多样性保护价值, 计算公式为:

$$V_x = D \times C_x \tag{12}$$

式中, V_x 为生物多样性保护价值, 元/ $(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; D 为生物多样性当量因子, 按照生态系统类型进行取值; C_x 为一个当量因子的经济价值量, 元/ hm^2 。

2.3 数据处理与分析 采用三因素方差分析 (ANOVA) 进行数据统计分析, 采用 Duncan 多重比较进行均值差异显著性检验。所有数据统计分析均在 SPSS 25.0 中进行, 采用 origin 2021 作图。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值量评估 生态系统类型对固碳释氧价值影响显著 ($P<0.05$), 对水源涵养价值、土壤保持价值和防风固土价值无显著影响 ($P>0.05$); 气候区对水源涵养价值、土壤保持价值、防风固土价值和固碳释氧价值影响显著; 地形对水源涵养价值、土壤保持价值和防风固土价值影响显著, 对固碳释氧价值无显著影响; 生态系统类型和地形的交互作用对水源涵养价值影响显著, 对土壤保持价值、防风固土价值和固碳释氧价值无显著影响; 气候区和地形的交互作用对水源涵养价值和土壤保持价值影响显著, 对防风固土价值和固碳释氧价值无显著影响, 其他因子之间的交互作用对生态系统服务价值影响不显著 (表 1)。多重比较的结果进一步显示: 不同气候区水源涵养价值、土壤保持价值、防风固土价值和固碳释氧价值差异显著, 不同地形条件下水源涵养价值、土壤保持价值和防风固土价值差异显著, 不同生态系统类型固碳释氧价值差异显著 (表 2)。

表 1 生态系统类型、气候区和地形对生态系统服务价值影响的 3 因素方差分析 F 值
Table 1 F values of three-way ANOVA of ecosystem services value under different ecosystems, regions and terrains

因子 Factor	生态系统服务价值 Ecosystem services value				自由度 df
	水源涵养 Water conservation	土壤保持 Soil retention	防风固土 Wind erosion retention	固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release	
生态系统类型 Ecosystem	1.65 ^{ns}	1.65 ^{ns}	0.02 ^{ns}	50.38 [*]	1
气候区 Region	95.92 [*]	29.39 [*]	356.00 [*]	18.21 [*]	2
地形 Terrain	31.30 [*]	146.90 [*]	4.55 [*]	1.10 ^{ns}	2
生态系统类型×气候区 Ecosystem×region	0.46 ^{ns}	1.30 ^{ns}	2.40 ^{ns}	1.71 ^{ns}	2
生态系统类型×地形 Ecosystem×terrain	6.34 [*]	1.27 ^{ns}	0.71 ^{ns}	2.26 ^{ns}	2
气候区×地形 Region×terrain	3.92 [*]	7.39 [*]	2.25 ^{ns}	0.02 ^{ns}	4
生态系统类型×气候区×地形 Ecosystem×region×terrain	0.34 ^{ns}	0.54 ^{ns}	1.59 ^{ns}	1.14 ^{ns}	4

注: * 表示差异显著 ($P<0.05$)。
Notes: * indicate significance level ($P<0.05$).

3.1.1 气候区对生态系统服务价值的影响。除固碳释氧价值差异显著外, 不同气候区油用牡丹与自然草地生态系统服务价值均无显著差异。佳县和洛宁县油用牡丹生态系统的固碳释氧价值显著低于自然草地 ($P<0.05$), 在建昌县二者差异不显著。尽管未达到统计显著水平 ($P>0.05$), 建昌县、佳县和洛宁县油用牡丹生态系统的 水源涵养价值均高于自然草地; 佳县油用牡丹生态系统的土壤保持价值低于自然草地, 而建昌县和洛宁县则高于自然草地; 建昌县和佳县油用牡丹生态系统的防风固土价值低于自然草地, 而洛宁县则高

于自然草地 (图 1)。建昌县和佳县油用牡丹生态系统的水源涵养价值均显著高于洛宁县; 建昌县、佳县和洛宁县油用牡丹生态系统的土壤保持价值不存在显著差异; 佳县油用牡丹生态系统的防风固土价值显著高于建昌县和洛宁县; 洛宁县和建昌县的固碳释氧价值显著高于佳县 (图 1)。

3.1.2 地形对生态系统服务价值的影响。除固碳释氧价值差异显著外, 不同地形条件下油用牡丹与自然草地生态系统服务价值无显著差异。油用牡丹生态系统的固碳释氧价值均显著低于自然草地 ($P<0.05$)。阳坡和阴坡油用牡丹生态

系统的水源涵养价值高于自然草地,而平地低于自然草地。阴坡油用牡丹生态系统的土壤保持价值高于自然草地,而阳坡和平地相似。阴坡油用牡丹生态系统的防风固土价值高于自然草地,而阳坡和平地低于自然草地($P>0.05$)(图2)。与阴坡和阳坡相比,平地油用牡丹生态系统水源涵养价值最高($P<0.05$);阳坡和阴坡土壤保持价值显著高于平地($P<0.05$);阳坡、阴坡和平地的防风固土价值和固碳释氧价值无显著差异($P>0.05$)(图2)。

3.1.3 生态系统类型对生态系统服务价值的影响。油用牡

丹生态系统的固碳释氧价值显著低于自然草地生态系统($P<0.05$),油用牡丹生态系统和自然草地生态系统的水源涵养价值、土壤保持价值、防风固土价值无显著差异(图3)。

3.2 生态系统的净化环境和生物多样性价值 由于净化环境价值和生物多样性保护价值计算方法的局限,因此未采用方差分析说明不同气候区和地形条件下两项生态系统服务价值的差异。油用牡丹和自然草地生态系统净化环境价值分别为 60.4 和 7.5 元/($\text{hm}^2\cdot\text{a}$),生物多样性保护价值分别为 1 197.2 和 1 838.0 元/($\text{hm}^2\cdot\text{a}$)。

表 2 生态系统类型、气候区和地形对生态系统服务价值量的影响(平均值±标准误)

Table 2 Effect of different ecosystems, regions and terrains on the value of ecosystem services (Mean±SE)

生态系统服务价值 Ecosystem services value//元/($\text{hm}^2\cdot\text{a}$)	气候区 Regions	阳坡 Sunny slope		阴坡 Shady slope		平地 Flat ground	
		油用牡丹 Oil tree peony	自然草地 Grassland	油用牡丹 Oil tree peony	自然草地 Grassland	油用牡丹 Oil tree peony	自然草地 Grassland
水源涵养价值	建昌县	892.2±0 Aab	693.7±0 Bb	1 045.7±153.5 Aab	1 000.8±153.5 Aab	1 050.9±230.6 Aab	1 281.4±230.6 Aa
Water conservation	佳县	1 022.1±110.2 Abc	831.2±0 Ad	1 095.9±0 Aab	905.0±0 Acd	1 175.1±0 Aa	1 219.8±22.4 Aa
	洛宁县	214.2±0 Bc	27.4±42.8 Cd	271.3±0 Bc	41.7±0 Bd	642.7±118.8 Ab	880.3±0 Aa
土壤保持价值	建昌县	2 655.2±513.1 Aa	2 351.3±297.1 Aa	2 596.8±241.4 Aa	2 276.0±171.5 Aa	6.1±0.3 Ab	5.7±0.2 Ab
Soil retention	佳县	908.5±74.5 Bb	1 233.0±129.5 Ba	1 147.0±151.9 Bab	1 105.8±93.8 Bab	4.5±0.7 Ac	5.3±0 Ac
	洛宁县	1 791.9±334.5 ABa	1 679.3±114.7 ABa	2 120.1±368.4 Aa	1 450.4±120.8 Ba	5.7±0.2 Ab	3.8±0.3 Bb
防风固土价值	建昌县	12.8±4.5 Bb	10.0±2.4 Bb	36.1±13.7 Ca	40.8±2.0 Ba	7.8±2.0 Bb	16.3±2.3 Cb
Wind erosion retention	佳县	568.8±83.9 Aa	568.2±73.2 Aa	634.2±78.9 Aa	647.0±95.5 Aa	650.3±74.0 Aa	785.9±13.5 Aa
	洛宁县	36.3±7.4 Bd	84.7±23.1 Bc	230.5±2.2 Ba	100.3±4.8 Bc	151.1±5.9 Bb	50.6±6.7 Bd
固碳释氧价值	建昌县	1 013.6±112.6 Aa	1 649.5±295.5 Ba	1 082.2±134.0 Ba	1 583.5±95.4 Ba	1 338.8±192.7 Aa	1 726.3±741.2 Aa
Carbon fixation and oxygen release	佳县	591.2±0.5 Bd	1 483.9±25.2 Ba	766.6±9.7 Bc	1 290.1±16.2 Cb	806.7±68.2 Ac	1 517.3±38.2 Aa
	洛宁县	1 135.9±167.5 Ad	2 424.8±79.3 Aa	1 652.1±210.9 Abc	1 912.4±59.5 Ab	1 253.5±203.6 Acd	2 620.1±107.5 Aa

注:不同大写字母表示在不同气候区间差异显著,不同小写字母表示在不同生态系统类型间差异显著($P<0.05$)。

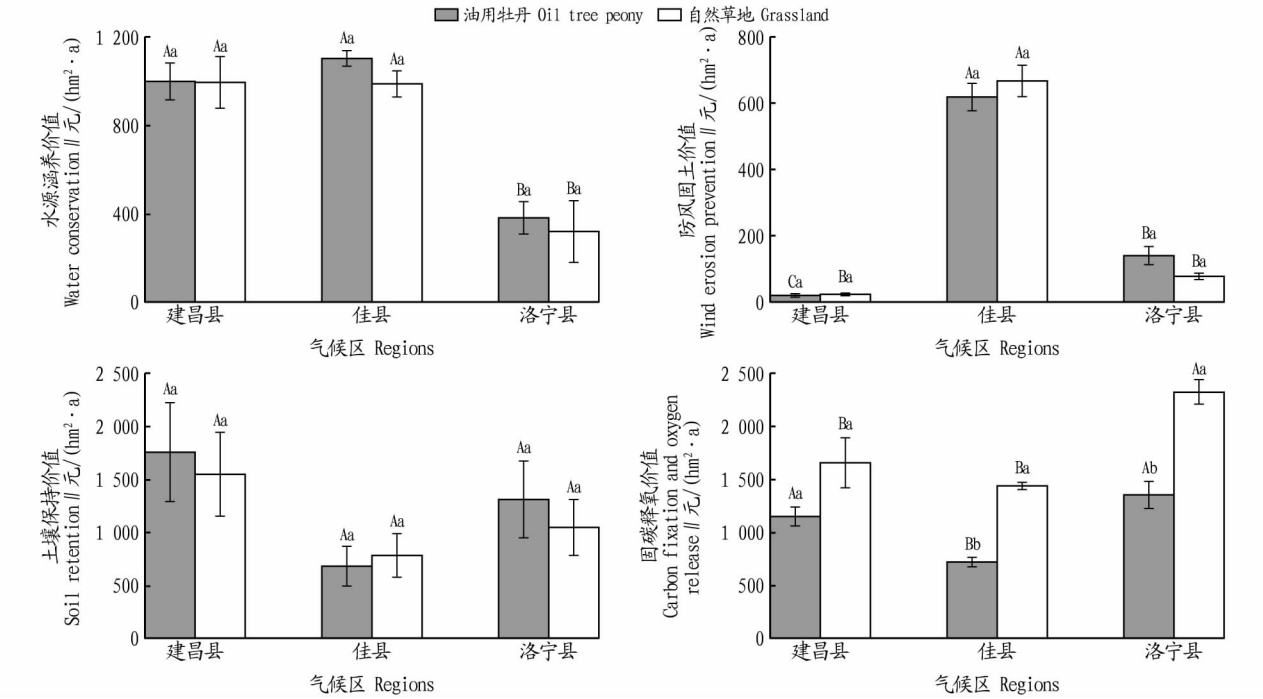
Notes: Different uppercase letters indicate significant differences among different regions, and different lowercase letters indicate significant differences in different ecosystems ($P<0.05$).

4 讨论

4.1 油用牡丹生态系统服务价值及区域差异 油用牡丹生态系统除提供直接产品外,还具有较大的生态价值,对区域内的土壤侵蚀、大气污染、碳水循环有着明显的改善作用^[32]。结果表明,由于受到气候、地形和土壤等自然因素的影响,不同气候区油用牡丹生态系统服务价值表现出较大差异,建昌县和佳县油用牡丹生态系统的水源涵养价值高于洛宁县;佳县油用牡丹生态系统的防风固土价值高于建昌县和洛宁县;建昌县和洛宁县油用牡丹生态系统的固碳释氧价值高于佳县,这主要与各区域生态环境条件有关。降水和蒸散是影响水源涵养功能的重要因素^[33],建昌县和佳县降水量不高,但由于蒸散量较低,综合作用下使得水源涵养价值较高。佳县土壤类型为砂质壤土,土壤可蚀性强^[34],增加了土壤风蚀强度,因而防风固土价值较高。固碳释氧价值主要与植物的净生产力有关^[20],洛宁县水热条件好,土壤保水保肥能力强,建昌县土壤养分含量丰富,两地油用牡丹生长好,净生产力高,固碳释氧价值较高。地形也是影响油用牡丹生态系统服务价值的重要因素。该研究结果表明,与平地相比,阴坡和阳坡油用牡丹生态系统的土壤保持价值更高;与阳坡和阴坡相比,平地油用牡丹生态系统的水源涵养价值更高。主要是由于坡度是影响土壤侵蚀强度的重要因素,坡地相较于平地有较大的土壤保持量和潜在土壤侵蚀强度^[35],因而

土壤保持价值更大。平地的水源涵养价值较高是由于坡度增加,地表径流增多,导致水源涵养价值降低^[26]。在不同地形条件下,阴坡油用牡丹生态系统防风固土价值和土壤保持价值均高于自然草地,这是由于油用牡丹是耐阴性植物,适度的遮阳有利于油用牡丹的生长^[36],群落盖度高于自然草地,从而提高了土壤保持价值和防风固土价值。

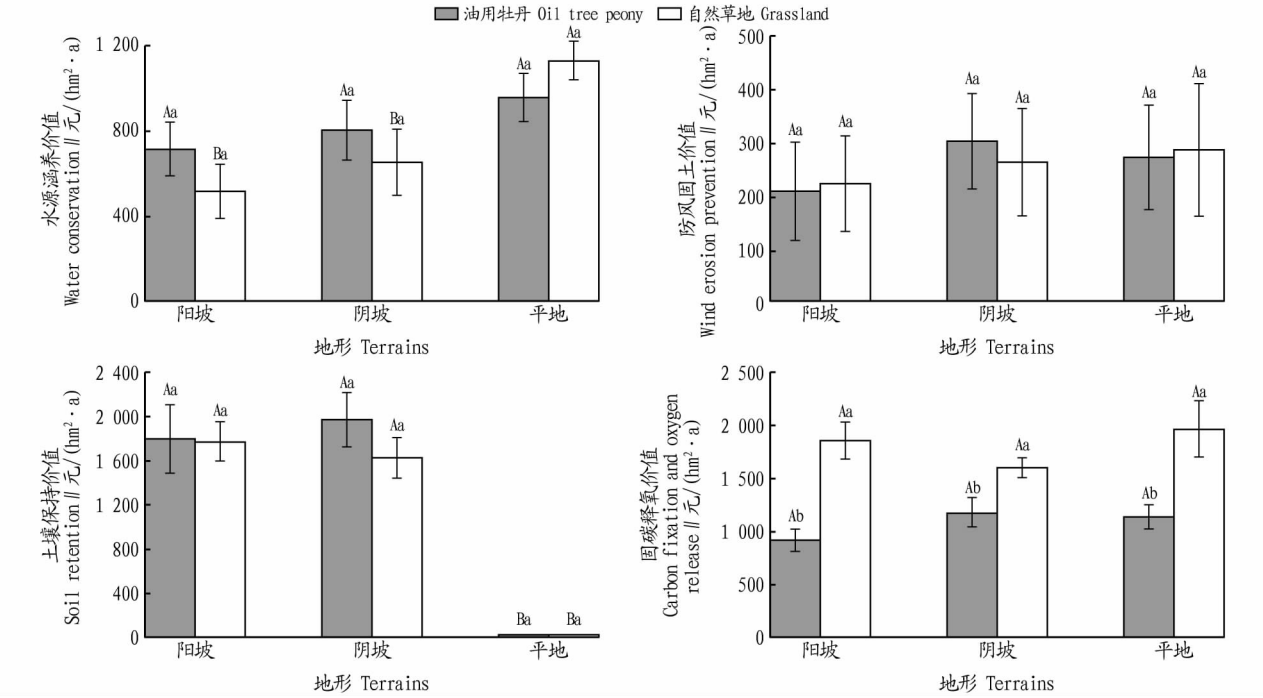
4.2 油用牡丹生态系统服务价值权衡 油用牡丹是一种经济型人工生态系统,从可持续发展与环境健康角度来看,应根据气候、地形和土壤条件,兼顾经济效益和生态效益。在坡度较大、容易发生水土流失的区域,以及较为干旱的区域应减少对牡丹人工生态系统的锄草及松土管理,适度促进牡丹生态系统内草本植物的发育,虽然会降低油用牡丹的产量,影响经济价值,但能够提供生态服务价值,确保环境健康的前提下获得一定经济收益。因而,在环境条件较差的区域内不应过分强调牡丹籽实产量,而应以生态服务价值优先,在此种情况下由于牡丹的引入会极大提高牡丹花期的观赏价值,同时通过籽实获得一定经济收益。该研究结果显示,除固碳释氧价值外,油用牡丹与草地生态系统的生态价值差异不显著,表明油用牡丹种植不会引起生态系统生态价值的大幅度下降。尽管油用牡丹与草地生态系统生态价值在统计学上不显著,但差异仍需得到关注。在不同气候区中,油用牡丹生态系统的水源涵养价值均高于自然草地,而固碳释



注:不同大写字母表示在不同气候区间差异显著,不同小写字母表示在不同生态系统类型间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different regions, and different lowercase letters indicate significant differences in different ecosystems ($P<0.05$).

图 1 不同气候区生态系统服务价值

Fig.1 The value of ecosystem services in different regions



注:不同大写字母表示在不同地形间差异显著,不同小写字母表示在不同生态系统类型间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different terrains, and different lowercase letters indicate significant differences in different ecosystems ($P<0.05$).

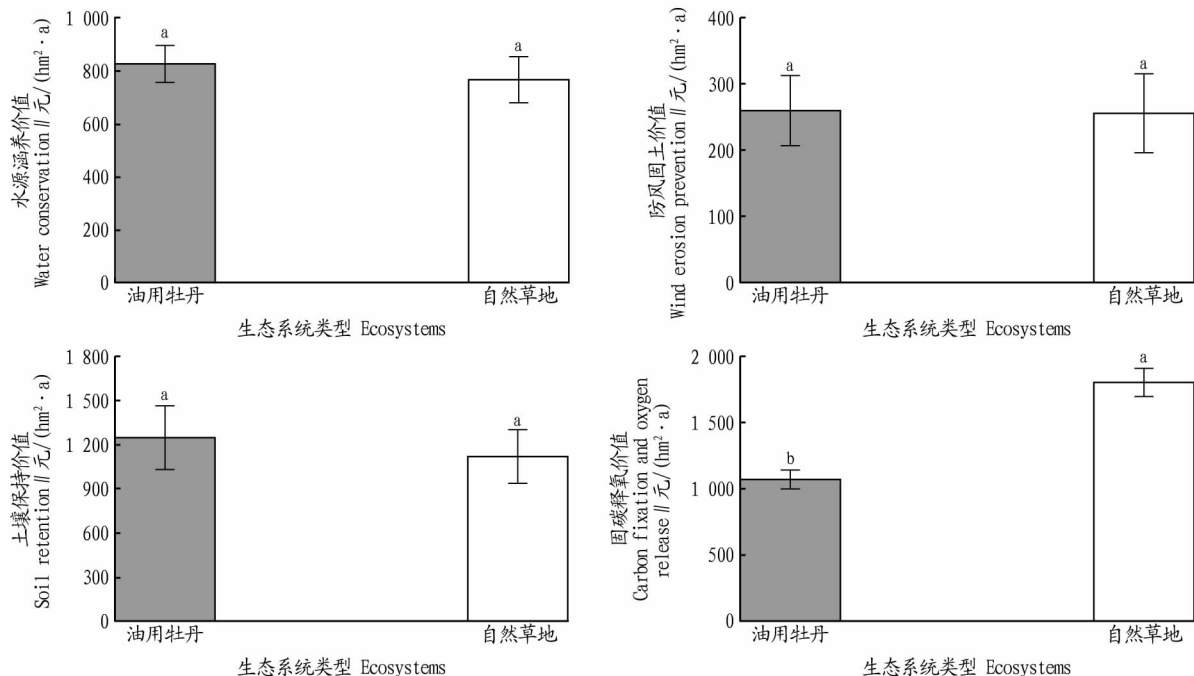
图 2 不同地形条件下生态系统服务价值

Fig.2 The value of ecosystem services in different terrains

油用牡丹植株冠幅大,可以有效截留降水,而草地对降雨的截留较弱,容易形成径流,导致水源涵养价值下降^[33]。洛宁县油用牡丹生态系统土壤保持价值和防风固土价值均高于自然草地,而佳县油用牡丹

生态系统土壤保持价值和防风固土价值均低于自然草地,主要是由于佳县相比洛宁县降雨少,牡丹生长状况不佳所致,这与饶恩明等^[35]关于增加植被覆盖可以有效缓解气流和水流对地表的侵蚀作用,减少土壤风蚀和水蚀,提高对地表土壤保护效果的结论一致。油用牡丹作为经济作物,种植时需要充分考虑行间距,以追求更高的经济产量,此外,油用牡丹

秋季果实采收也会造成部分碳损失,草地生态系统尽管植被矮小,但植被生长密度大,使草地的固碳释氧量高于油用牡丹,从而发挥更大的固碳释氧价值。综上可见,通过对油用牡丹生态系统的合理管理,平衡油用牡丹生态系统经济与生态服务价值,是发展油用牡丹种植产业值得关注的重大问题。



注:不同小写字母表示在不同生态系统类型间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different ecosystems ($P<0.05$).

图3 不同生态系统类型服务价值

Fig.3 The value of ecosystem services in different ecosystems

4.3 对油用牡丹产业发展的启示 油用牡丹作为一种木本油料资源植物,有助于缓解国家能源危机,因此发展油用牡丹产业,是实施生态富民工程的良好选择^[37]。根据该研究结果,应对油用牡丹人工生态系统的生态价值给予充分关注。鉴于油用牡丹生态系统服务价值的区域差异,宜根据各地区的生态条件,优化种植方式,最大限度地提高生态价值。例如,由于受自然条件和管理措施影响,佳县油用牡丹生态系统生态价值偏低,因此在生态条件较差的地区,宜将改善生态环境作为油用牡丹种植的主要目标,不进行或较少进行人为管理,充分发挥其生态价值;而对于生态条件较好的地区,如建昌县和洛宁县,可更加强调油用牡丹的经济价值,在保障经济效益最大化的同时兼顾生态效益。在坡地种植油用牡丹时,应适当促进牡丹群落内草本植物的发育。针对油用牡丹喜阴性的特点,宜与其他经济树种结合,进行林下种植,提高油用牡丹的经济和生态价值。

5 结论

该研究从水源涵养、防风固土、土壤保持、固碳释氧、净化环境和生物多样性保护6个方面对不同气候区和地形条件下的油用牡丹生态系统服务价值进行了定量评估,并与自然生态系统进行比较,得出如下结论:油用牡丹生态系统生

态功能重要。气候和地形对油用牡丹生态系统服务价值影响较大,建昌县和佳县油用牡丹生态系统的水源涵养价值显著高于洛宁县;佳县油用牡丹生态系统的防风固土价值显著高于建昌县和洛宁县;建昌县和洛宁县油用牡丹生态系统的固碳释氧价值显著高于佳县。平地水源涵养价值最高;阳坡和阴坡土壤保持价值显著高于平地。油用牡丹生态系统固碳释氧价值显著低于自然草地,其水源涵养、土壤保持、防风固土价值与草地相比无显著差异;佳县生态条件较差,其油用牡丹生态系统防风固土价值和土壤保持价值低于草地,建昌县和洛宁县生态条件较好,其油用牡丹生态系统土壤保持价值高于自然草地。

参考文献

- [1] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387 (6630): 253–260.
- [3] ZHENG H, WANG L J, PENG W J, et al. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2019, 116 (17): 8623–8628.
- [4] BAK SENT E Z. Assessment and valuation of key ecosystem services provided by two forest ecosystems in Turkey [J/OL]. Journal of environmental management, 2021, 285 [2021–10–17]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111617>.

- 2021;112135.
- [5] AROWOLO A O, DENG X Z, OLATUNJI O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria[J]. Science of the total environment, 2018, 636: 597–609.
 - [6] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. Ecosystem services, 2017, 28: 1–16.
 - [7] COSTANZA R, KUBISZEWSKI L. The authorship structure of "ecosystem services" as a transdisciplinary field of scholarship[J]. Ecosystem services, 2012, 1(1): 16–25.
 - [8] ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological economics, 2010, 69(7): 1416–1426.
 - [9] 裴佩卿, 付波霖, 刘海新, 等. 锡林郭勒盟草地生态系统服务功能价值动态估算[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3837–3849.
 - [10] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2497–2505.
 - [11] 王庆慧, 李婧贤, 彭羽, 等. 我国灌丛生态系统服务功能价值评估[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 233–237.
 - [12] 缪建群, 杨文亭, 杨滨娟, 等. 崇义客家梯田生态系统服务功能及价值评估[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1817–1831.
 - [13] 台辉, 秦富仓, 王迪海, 等. 残塬沟壑区苹果园生态服务价值评估[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 210–216.
 - [14] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086–2096.
 - [15] PLUMMER M L. Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services[J]. Frontiers in ecology and the environment, 2009, 7(1): 38–45.
 - [16] KIBRIA A S M G, BEHIE A, COSTANZA R, et al. The value of ecosystem services obtained from the protected forest of Cambodia: The case of Veun Sai-Siem Pang National Park[J]. Ecosystem services, 2017, 26: 27–36.
 - [17] 刘胜涛, 高鹏, 刘潘伟, 等. 泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3302–3310.
 - [18] 宁虎森, 何苗, 罗青红, 等. 新疆怪柳林生态服务功能及其价值评估分析[J]. 生态科学, 2019, 38(4): 111–118.
 - [19] ZHAI R, TAO F L. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China[J]. Science of the total environment, 2017, 605/606: 219–229.
 - [20] WANG B, GAO P, NIU X, et al. Policy-driven China's grain to green program: Implications for ecosystem services[J]. Ecosystem services, 2017, 27: 38–47.
 - [21] 苏常红, 王亚璐. 汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7886–7898.
 - [22] SONG F, SU F L, MI C X, et al. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China[J/OL]. Science of the total environment, 2020, 751 [2021-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141778>.
 - [23] 张凯月, 贺春玲, 侯小改, 等. 油用牡丹经济价值和景观生态价值研究现状[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 66–71.
 - [24] 张晓龙, 周继华, 来利明, 等. 荒漠河岸多枝柽柳灌丛碳氮磷化学计量特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 698–706.
 - [25] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 等. 中国森林生态系统服务价值评估指标体系初探[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 5–9.
 - [26] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455–2462.
 - [27] 王莉雁, 肖燚, 欧阳志云, 等. 国家级重点生态功能区生态系统生产总值核算研究: 以阿尔山市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 146–154.
 - [28] 江凌, 肖燚, 欧阳志云, 等. 基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 21–25.
 - [29] 徐瑶, 陈涛. 藏北草地退化与生态服务功能价值损失评估: 以申扎县为例[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5078–5087.
 - [30] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 等. 海河流域农田生态系统环境损益分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2938–2945.
 - [31] 石福习, 宋长春, 赵成章, 等. 河西走廊山地-绿洲-荒漠复合农田生态系统服务价值变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1598–1604.
 - [32] 王兵, 魏江生, 胡文. 中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1936–1945.
 - [33] 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 217–223.
 - [34] 迟文峰, 白文科, 刘正佳, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古高原土壤风蚀研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1024–1033.
 - [35] 饶恩明, 肖燚. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8741–8749.
 - [36] 尚三娟, 王义婧, 王楠, 等. 光照强度对紫斑牡丹生理及生长特性的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2963–2973.
 - [37] 史国安, 焦封喜, 焦元鹏, 等. 中国油用牡丹的发展前景及对策[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 124–128.

(上接第 60 页)

- [3] 郑华坤, 林雄杰, 林辉, 等. 巨菌草 (*Pennisetum giganteum*) 研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(6): 681–687.
- [4] 刘凤山, 林辉, 林兴生, 等. 巨菌草对生态脆弱区治理与修复的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(7): 111–113.
- [5] 龚建华, 薛伦伦, 康敏, 等. 巨菌草的重金属富集特性及对土壤的修复效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(2): 154–161.
- [6] 刘凤山, 宋静, 蔡杨星, 等. 巨菌草对土壤生态环境的影响[J]. 武夷科学, 2019, 35(2): 80–85.
- [7] 林兴生, 林占熹, 林冬梅, 等. 荒坡地种植巨菌草对土壤微生物群落功能多样性及土壤肥力的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4304–4312.
- [8] 吴强. 黄河乌兰布和沙漠段巨菌草生长特性和防风固沙效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [9] 龙鸿艳. 巨菌草在喀什地区的引种试验[J]. 中国畜禽种业, 2016, 12(2): 32–33.
- [10] 宋静, 程现光, 穆胜国, 等. 黄土高原沟壑区巨菌草引种试验[J]. 现代农业科技, 2017(17): 242–244.
- [11] 脱忠平, 闫晓玲, 段景峰, 等. 黄土高原沟壑区绿洲 1 号菌草引种栽培试验[J]. 现代农业科技, 2020(5): 164–165, 170.
- [12] 邓振山, 李买平, 郝雷, 等. 巨菌草内生细菌多样性及其促生特性[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1213–1221.
- [13] 姚俊新, 林辉, 林兴生, 等. 巨菌草种植对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(3): 40–45.
- [14] 叶文雨, 谢序泽, 许钰澄, 等. 基于高通量测序技术分析 2 种菌草根际土壤真菌群落多样性[J]. 热带作物学报, 2020, 41(3): 556–563.
- [15] 王强, 左合君, 李钢铁, 等. 巨菌草留茬沙障防风固沙效益及其适宜模式研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1234–1241.
- [16] 梅兰, 黄在兴, 宋昭昭, 等. 巨菌草不同生长时期对砒砂岩地区土壤理化性质及细菌群落结构的影响[J]. 微生物学报, 2019, 59(10): 2038–2050.
- [17] 何丽娟. 库布齐沙漠甘草不同种植措施对土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [18] 周扬. 巨菌草对攀西干热河谷区土壤理化性质改良效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.