



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估

普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 刘淑艳, 张克强, 李元

引用本文:

普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 刘淑艳, 张克强, 李元. 洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 958–966.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0237>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 286–294 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0270>

河北北戴河区农田生态系统服务功能价值测算研究

刘小丹, 赵忠宝, 李克国

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 390–396 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0005>

冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究

张帆

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 87–95 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0013>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响

胡岚, 梁波, 陈云峰, 李钰飞, 张玉峰, 郑春燕, 伍玉鹏

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 80–87 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0661>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 等. 洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 958–966.
PU Y S, CHEN J J, ZU Y Q, et al. Evaluation of the service function value of rice field ecosystem with different planting patterns in Erhai Lake basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 958–966.



开放科学 OSID

洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估

普燕爽¹, 陈建军¹, 祖艳群¹, 刘淑艳¹, 张克强², 李元^{1*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南省农业环境污染控制与生态修复工程实验室, 昆明 650201; 2. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004)

摘要:为研究不同种植模式稻田生态系统的服务功能价值,通过田间试验,设置Y-OL(70%化肥+30%牛粪-水稻-黑麦草)、Y-OV(70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苜蓿)、Y-ON(70%化肥+30%牛粪-水稻-冬闲)3种优化施肥轮作处理,以常规施肥单作处理C-ON(100%化肥-水稻-冬闲)为对照,结合功能价值评价法和当量因子法对稻田生态系统的服务功能价值进行估算。结果表明,Y-OL和Y-OV处理稻田生态系统服务功能价值分别为169 669元·hm⁻²和168 405元·hm⁻²,Y-ON处理为99 247元·hm⁻²,C-ON处理为72 717元·hm⁻²;Y-OL和Y-OV处理服务功能总价值均显著高于Y-ON和C-ON处理,且Y-ON处理服务功能总价值显著高于C-ON处理($P<0.05$)。其中,优化施肥轮作处理的农产品经济价值、气体调节价值、消纳废弃物价值、水质净化价值、土壤有机质积累价值、营养物质循环价值、生物多样性价值和美学景观价值均显著高于常规施肥单作处理($P<0.05$)。优化施肥轮作处理中,水稻-紫花苜蓿轮作的水质净化价值和营养物质循环价值显著高于水稻-黑麦草轮作($P<0.05$)。综上所述,70%化肥+30%牛粪-水稻-黑麦草轮作和70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苜蓿轮作的种植模式能有效提高稻田生态系统的服务功能价值,并且70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苜蓿轮作模式效果更佳。

关键词:牛粪;化肥;稻田轮作;生态系统服务功能;价值评估

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)05-0958-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0237

Evaluation of the service function value of rice field ecosystem with different planting patterns in Erhai Lake basin

PU Yanshuang¹, CHEN Jianjun¹, ZU Yanqun¹, LIU Shuyan¹, ZHANG Keqiang², LI Yuan^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Yunnan Engineering Laboratory for Agricultural Environment Pollution Control and Ecological Remediation, Kunming 650201, China; 2. Dali Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: Field experiments were conducted to study the service function value of rice field ecosystems with different planting patterns. Using Y-OL (70% chemical fertilizer+30% cow manure-rice-*Lolium multiflorum* Lamk.), Y-OV (70% chemical fertilizer + 30% cow manure-rice-*Vicia villosa* Rothvar), and Y-ON (70% chemical fertilizer +30% cow manure-rice-winter fallow), three rotation treatments were conducted, and conventional fertilization and tillage mode C-ON (100% chemical fertilizer-rice-winter fallow) were used as the control. The functional value evaluation method and equivalent factor method were combined to estimate the service function value of the rice field ecosystem. Results showed that the service function values of the rice field ecosystem services in the Y-OL and Y-OV treatments were 169 669 yuan·hm⁻² and 168 405 yuan·hm⁻², respectively; the Y-ON and C-ON treatments yielded 99 247 yuan·hm⁻² and 72 717 yuan·hm⁻², respectively. The processing value of the Y-OL and Y-OV functions was significantly higher than that of Y-ON and C-ON, and the total value of the Y-ON processing service function was significantly higher than that of the C-ON processing ($P<0.05$). Among

收稿日期:2021-04-20 录用日期:2021-09-13

作者简介:普燕爽(1995—),女,云南玉溪人,硕士研究生,研究方向为农业面源污染控制。E-mail:946415920@qq.com

*通信作者:李元 E-mail:liyuan@ynau.edu.cn

基金项目:云南省教育厅科学研究基金产业化培育项目(2016CYH11);云南省农田无公害生产创新团队项目(2017HC015)

Project supported: Yunnan Provincial Education Department's Scientific Research Fund Industrialization Project(2016CYH11); The Science Technology Innovation Team of Yunnan Province(2017HC015)

them, the economic values of agricultural products, gas regulation, waste absorption, water purification, soil organic matter accumulation, nutrient recycling, biodiversity, and aesthetic landscapes of optimized fertilization and rotation were significantly higher than those of the conventional fertilization method ($P<0.05$). In the optimized fertilization rotation, the water purification and nutrient cycle values of the rice-*Vicia villosa* Rothvar rotation were significantly higher than those of the rice-*Lolium multiflorum* Lamk. rotation ($P<0.05$). In summary, 70% chemical fertilizer + 30% cow manure-rice-*Lolium multiflorum* Lamk and 70% chemical fertilizer + 30% cow manure-rice-*Vicia villosa* Rothvar could effectively improve the functional service value of the rice field ecosystem, with the 70% chemical fertilizer+30% cow manure-rice-*Vicia villosa* Rothvar demonstrating a better effect.

Keywords: cow manure; chemical fertilizer; rice field rotation; ecosystem service function; value evaluation

1991年,生物多样性定量研究会议使生态系统服务功能及其价值评估研究成为学者关注的热点。COSTANZA等^[1]对整个生物圈的生态系统服务功能价值的货币化估值,成为生态系统价值评估研究发展中的一个重要里程碑。20世纪90年代以来,生态系统评估研究主要围绕全球或区域尺度、流域尺度、单个生态系统以及物种和生物多样性保护^[2]4个方面展开。不同类型生态系统的生态价值不同,农田生态系统的服务功能既复杂又特殊^[3]。我国生态系统服务价值的评估标准或指标体系主要有三套,分别为COSTANZA等^[1]、MA(联合国千年生态系统评估)^[4]和谢高地等^[5]的分类方法。整体来看,三种分类方法均包括了食物、工业原材料等产品的供给服务,水、气候、气温等的调节服务,文化、美学、教育等的文化服务以及营养物质循环、生物多样性维持的支持服务,三种服务功能分类可看作是MA分类的细化。生态系统服务价值评价方法主要有功能价值法和当量因子法,其中功能价值法包括市场价值法、替代市场法和模拟市场评估法^[6-9]。在2003年之前,我国对生态系统价值的评估主要集中在对森林^[10-12]、湿地^[13]、景观^[14]、河流^[15-16]生态系统的研究,特别是针对森林生态系统的价值评估研究最多,而农田生态系统价值评估方面的内容鲜有报道。赵荣钦等^[17]在2003年首次对农田生态系统服务功能进行界定和分类。随后,我国主要对不同区域或特定区域的不同时段的农田生态系统服务价值展开研究^[18-20]。

已有的稻田生态系统价值评估存在以下不足:①评价指标和评价体系的构建设没有针对性;②在评价指标数据的选择上,大多是根据年度统计数据和经验公式进行计算,没有进行田间试验测定;③评价体系较为单一,对不同施肥和种植模式稻田的生态系统价值评价较少。本研究结合大理洱海流域农业 development 状况,对比分析奶牛粪便配施化肥的施肥方式和水稻与牧草轮作的种植模式与常规种植模式下稻田生态系

统服务的功能价值。在已有的自然生态系统价值评估方法的基础上,结合田间试验对该模式农产品的生产功能、气体调节功能、消纳废弃物功能、水质净化功能、土壤有机质累积功能、营养物质循环功能、维持生物多样性功能、提供美学景观功能价值进行估算,以更直观的方式表达该模式的优势,以期改革稻田耕作制度,为我国稻田生态补偿机制的建立提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验田位于农业农村部大理农业环境科学观测实验站(25°50'N, 100°07'E)。该区域季风气候明显,干湿季分明,海拔1900 m,降雨主要集中在5—10月,2019年稻季(6—10月)总降雨量为466.2 mm,平均气温在21℃左右,年日照时数为1663 h,平均相对湿度为79.22%,风向主要为西南风,平均风速0.57 m·s⁻¹。供试土壤为潜育型水稻土。

1.2 试验设计

于2019年6月3日至2020年5月12日开展田间小区试验,共设水稻-黑麦草(Y-OL)、水稻-紫花苜蓿(Y-OV)、水稻-冬闲(Y-ON)3种轮作模式,施肥方式为优化施肥,并以常规施肥-冬闲(C-ON)模式作为对照,每种处理设置3个重复,各处理随机分布,各试验小区面积为30 m²(6 m×5 m)。水稻季于2019年6月3日至10月5日,水稻种植及稻田理化性质基本情况见课题组前期已发表的文献^[21]。牧草季于2019年10月23日至2020年5月12日,牧草季牧草每次刈割后施大理当地牛粪浆约40 m³·hm⁻²,不施化肥。黑麦草和紫花苜蓿2019年10月23日播种,2020年5月12日收割。

1.3 样品采集及指标测定

水稻季水样采集及测定方式与课题组前期已发表的文献^[21]相同。

土壤样品采集:于水稻收割和牧草刈割后在试

验田中采用棋盘法选取5个采样点用土钻采集0~20 cm土壤样品,风干、过筛、备用。测定土壤有机质(SOM)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、碱解氮、有效磷、速效钾。

植物样品采集:①水稻:于水稻收获期进行一次采收,产量使用1 m×1 m的样方采样,分别测定籽粒和茎叶的晒干产量,与此同时,在小区的非边缘位置采集3株带根的水稻植株,并将其根、茎叶、籽粒各部分分别混合、烘干、磨碎,测定其TN、TP、TK含量。②牧草:紫花苕于生长旺盛期进行第一次刈割,于水稻种植前进行第二次刈割,同时对黑麦草进行刈割。牧草产量使用1 m×1 m的样方采样,测算牧草鲜产量。将适量牧草带回实验室烘干,计算含水率。将烘干牧草磨碎过筛,测定TN、TP、TK含量。

土壤和植物样品测定方法均参照《土壤农化分析》第三版。

1.4 生态系统服务价值评估

采用Excel 2010整理试验数据,采用SPSS 21.0进行差异性统计分析($\alpha=0.05$)。

1.4.1 农产品经济价值

农田生态系统中,农产品生产功能是其最基本的功能。水稻-牧草轮作系统中,稻谷、秸秆、牧草均有明确的市场价格,可进行市场交换。采用市场价值法,估算农产品服务价值^[7]。其计算公式:

$$V_1 = \sum L_r \times T_r \quad (1)$$

式中: V_1 表示农产品经济价值,元·hm⁻²; L_r 表示农产品产量,kg·hm⁻²; T_r 表示对应农产品的当地市场价格。通过当地市场调查得知,稻谷的价格为5元·kg⁻¹,秸秆的价格为0.5元·kg⁻¹,紫花苕价格为3元·kg⁻¹(该部分价格由大理实验站提供),因紫花苕和黑麦草综合评价为同一等级^[22],因此黑麦草价格取值与紫花苕一致。

1.4.2 气体调节价值

植物在生长过程中的气体调节价值包括固定CO₂、释放O₂以及吸收有害气体(粉尘、SO₂、NO_x)的服务价值。本研究采用影子价格法,参照薛宝林等^[6]的方法来计算稻田系统固氮释氧的价值,采用机会成本法计算农田作物吸收有害气体的价值。具体计算方法及参数如下。

(1)作物固定CO₂的价值计算公式:

$$V_{21} = \frac{0.44L \times (C_{TS} + C_{ZL})}{2} \quad (2)$$

式中: V_{21} 表示固定CO₂的价值,元·hm⁻²; L 为作物产

量,kg·hm⁻²; C_{TS} 为瑞典碳税率(950元·t⁻¹); C_{ZL} 为我国造林成本(260.90元·t⁻¹,以C计)。

(2)作物释放O₂的价值计算公式:

$$V_{22} = \frac{0.19L \times (C_{GYO} + C_{ZLO})}{2} \quad (3)$$

式中: V_{22} 表示释放O₂的价值,元·hm⁻²; L 为作物产量,kg·hm⁻²; C_{GYO} 为制氧工艺成本(400元·t⁻¹,以O₂计); C_{ZLO} 为造林成本(352.93元·t⁻¹,以O₂计)。

(3)不同植被类型吸收有害气体的价值不同^[23],具体计算公式:

$$V_{23} = \sum (D_{(d,s,n)} \times I_{(r,m)} \times C_{(d,s,n)}) \quad (4)$$

式中: V_{23} 表示吸收有害气体的价值,元·hm⁻²; D_d 、 D_s 、 D_n 分别表示单位面积农田吸收粉尘、SO₂、NO_x的基本通量,其中 D_d 为33.2 kg·hm⁻², D_s 为45 kg·hm⁻², D_n 为33.3 kg·hm⁻²; C_d 、 C_s 、 C_n 分别表示消减和净化粉尘、SO₂、NO_x的成本,其中 C_d 为0.17元·kg⁻¹, C_s 、 C_n 均为0.6元·kg⁻¹; I_r 、 I_m 为水稻和牧草的修正系数^[18,24]。

1.4.3 消纳废弃物价值

洱海流域奶牛养殖业发达,大量牛粪得不到合理利用和处置,牛粪合理还田可减少因畜禽粪便随意处置而带来的环境污染。本研究采用治理费用法对农田消纳废弃物的价值进行估算^[8],其计算公式:

$$V_3 = EP \times C_f \quad (5)$$

式中: V_3 表示消纳废弃物的价值,元·hm⁻²; EP 为作物单位面积畜禽粪便施入量,kg·hm⁻²; C_f 为粪便处理平均成本,本研究取0.48元·kg⁻¹(由牛粪制成有机肥的成本算得)。

1.4.4 水质净化价值

施肥方式和轮作模式会影响稻田下渗水水质,而对稻田氮磷流失和水污染产生影响。本研究采用不同植被吸收有害气体的校正系数法对不同处理模式净化污水的效果进行系数校正,根据普燕爽等^[21]的研究中不同处理模式的下渗水TN时间间隔加权平均浓度进行校正。具体计算公式:

$$V_4 = Q \times T \times C_w \quad (6)$$

式中: V_4 表示水质净化价值,元·hm⁻²; Q 为稻田渗水量,m³·hm⁻²; T 为不同处理污水处理量修正系数, C_w 为污水处理成本,0.55元·m⁻³^[25]。其中,渗水量(m³) = 渗水速度(mm·d⁻¹)×面积(m²)×浸没天数(d)×10⁻³。

1.4.5 土壤有机质累积价值

有机肥与化肥配施可加速土壤有机质的累积^[26],改善土壤质量,减少化肥施入带来的环境污染风险。本研究采用机会成本法对土壤有机质积累的价值进

行计算^[24,27],具体公式:

$$V_5=S\times T\times q\times OM\times C_{SOM}$$
 (7)

式中: V_5 表示土壤有机质积累价值,元·hm⁻²; S 为作物种植面积, hm²; T 为耕层厚度(0.2 m); q 为土壤容重(1 250 kg·m⁻³)^[28]; OM 为土壤有机质含量, g·kg⁻¹; C_{SOM} 为土壤有机质价格(0.051 3 元·kg⁻¹)^[24]。

1.4.6 营养物质循环价值

作物还田后可作为养分输入到土壤中,从而减少化学肥料的施用。水稻-牧草轮作系统,根据测定出的植物体内N、P、K含量,采用影子价格法计算系统营养物质循环价值。具体计算公式:

$$V_6=L_r\times(CN+CP+CK)\times P$$
 (8)

式中: V_6 表示营养物质循环价值,元·hm⁻²; L_r 为各作物产量, kg·hm⁻²; CN 为各类型作物N的百分比; CP 为各类型作物P的百分比; CK 为各类型作物K的百分比; P 为化肥平均价格(4.155 元·kg⁻¹)^[24]。

1.4.7 生物多样性价值

水稻-牧草轮作的生态种植模式,不仅起到改良农业生态系统的作用,同时还能提高生产能力,在维持生物多样性方面有重要作用^[29]。采用当量因子法对该部分价值进行估算。具体计算公式:

$$V_7=S_k\times C_k\times E_a$$
 (9)

$$E_a=S_r\times F_r$$
 (10)

其中: V_7 表示生物多样性价值,元·hm⁻²; S_k 为作物种植面积, hm²; C_k 为农用地单位面积生物多样性价值当量因子; E_a 表示单位当量因子的价值量,元·hm⁻²; S_r 表示粮食作物播种面积占作物播种总面积的百分比, %; F_r 表示单位面积农田生态系统粮食生产的净利润,元·hm⁻²。

1.4.8 美学景观价值

植物群落所形成的独特优美自然景观可以让人感到身心愉悦,具有潜在娱乐用途以及文化和艺术价值。应用当量因子法估算其价值,具体计算公式:

$$V_8=S_k\times C_l\times E_a$$
 (11)

$$E_a=S_r\times F_r$$
 (12)

其中: V_8 表示美学景观价值,元·hm⁻²; S_k 为作物种植面积, hm²; C_l 为农用地单位面积美学景观价值当量因子; E_a 表示单位当量因子的价值量,元·hm⁻²; S_r 表示粮食作物播种面积占作物播种总面积的百分比, %; F_r 表示单位面积农田生态系统粮食生产的净利润,元·hm⁻²。

各种种植模式生态系统服务功能总价值(E)由下式计算:

$$E=V_1+V_2+V_3+V_4+V_5+V_6+V_7+V_8$$
 (13)

2 结果与分析

2.1 农产品经济价值

不同处理稻谷、秸秆、牧草产量如表1所示。稻谷产量在9 900~11 533 kg·hm⁻²之间,各处理间无显著差异。Y-OV处理秸秆产量达8 467 kg·hm⁻²,显著高于其他三种处理,且C-ON、Y-OL、Y-ON三种处理秸秆产量无显著差异。无轮作处理农田在冬季农闲,轮作处理中Y-OL牧草产量显著高于Y-OV处理。不同施肥及轮作的稻田生态系统农产品经济价值不同(表1)。轮作系统农产品经济价值均在10万元·hm⁻²以上,显著高于无轮作系统,轮作系统的农产品经济价值约为无轮作系统的2倍。

2.2 气体调节价值

稻田固定CO₂、释放O₂、吸收有害气体的价值以及气体调节的总价值如表2所示。轮作处理气体调节总价值为11 871~12 194 元·hm⁻²,无轮作处理为5 809~5 933 元·hm⁻²。各处理中固定CO₂的价值最高,其次是释放O₂的价值。

2.3 消纳废弃物价值

不同处理消纳废弃物的价值如表3所示。Y-OL和Y-OV处理消纳废弃物的价值均为22 817 元·hm⁻²,Y-ON处理消纳废弃物的价值为19 200 元·hm⁻²,由于C-ON处理不施牛粪只施化肥,因而其没有

表1 不同处理农产品产量及其经济价值

Table 1 Output of agricultural products and their economic value in different treatments

处理 Treatment	稻谷产量 Rice yield/(kg·hm ⁻²)	秸秆产量 Straw yield/(kg·hm ⁻²)	牧草产量 Forage yield/(kg·hm ⁻²)	农产品经济价值/(元·hm ⁻²) Economic value of agricultural products/(yuan·hm ⁻²)
C-ON	9 900±860a	7 133±377b	—	53 067±4 321b
Y-OL	11 533±555a	7 467±309b	16 686±782a	111 457±1 422a
Y-OV	11 400±1 435a	8 467±330a	14 863±741b	105 823±8 702a
Y-ON	10 166±449a	7 233±531b	—	54 450±2 476b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表2 不同处理气体调节价值

Table 2 Gases regulation value in different treatments

处理 Treatment	总生育期 Total growth period/d	修正系数 Correction coefficient	固定 CO ₂ /(元·hm ⁻²) Fixed CO ₂ / (yuan·hm ⁻²)	释放 O ₂ /(元·hm ⁻²) Release O ₂ / (yuan·hm ⁻²)	吸收有害气体/(元·hm ⁻²) Absorb harmful gas/ (yuan·hm ⁻²)	气体调节总价值/(元·hm ⁻²) Total value of gas conditioning/ (yuan·hm ⁻²)
C-ON	128	1	4 538±258b	1 218±69b	53	5 809±327b
Y-OL	329	2.57	9 507±105a	2 553±28a	135	12 194±133a
Y-OV	329	2.57	9 252±532a	2 484±142a	135	11 871±675a
Y-ON	128	1	4 635±251b	1 245±67b	53	5 933±318b

表3 不同处理消纳废弃物的价值

Table 3 The value of waste disposal in different treatments

处理 Treatment	单位面积施肥量 Fertilizer amount per unit area/ (kg·hm ⁻²)	粪便处理价格 (元·kg ⁻¹) Manure treatment price/(yuan·kg ⁻¹)	消纳废弃物价值 (元·hm ⁻²) Waste consumption value/(yuan·hm ⁻²)
C-ON	0	0.48	0
Y-OL	47 535	0.48	22 817
Y-OV	47 535	0.48	22 817
Y-ON	40 000	0.48	19 200

消纳废弃物的价值。

2.4 水质净化价值

由表4可知,各处理时间间隔加权平均浓度不同,因而水质净化价值不同。各处理水质净化价值在5 808~11 906 元·hm⁻²之间,并且优化施肥处理水质净化价值均高于常规施肥处理。Y-OV 处理水质净化价值最高,为11 906 元·hm⁻²,比C-ON处理多6 098 元·hm⁻²。

2.5 土壤有机质累积价值

土壤有机质含量及其价值如表5所示。优化施肥处理土壤有机质含量显著高于常规施肥处理,轮作处理显著高于无轮作处理。其中,Y-OL处理有机质含量分别比C-ON、Y-OV、Y-ON处理高42.62%、4.64%、19.10%。土壤有机质的价值为7 060~10 069 元·hm⁻²,其中Y-OL和Y-OV处理间无显著差异,两者显著高于Y-ON处理,Y-ON处理土壤有机质积累价值为

表5 不同处理土壤有机质积累价值

Table 5 The accumulation value of soil organic matter in different treatments

处理 Treatment	土壤有机质含量 Soil organic matter content/(g·kg ⁻¹)	土壤有机质累积价值/(元·hm ⁻²) Soil organic matter accumulation value/(yuan·hm ⁻²)
C-ON	55.05±0.02c	7 060±2c
Y-OL	78.51±7.25a	10 069±929a
Y-OV	75.03±3.65a	9 622±468a
Y-ON	65.92±2.93b	8 454±375b

8 454 元·hm⁻²,显著高于C-ON处理。

2.6 营养物质循环价值

C-ON和Y-ON处理营养物质循环价值为水稻秸秆的循环价值,Y-OL和Y-OV处理则包括水稻秸秆和牧草的营养物质循环价值,具体计算结果如表6所示。Y-OV处理水稻秸秆营养物质循环价值为765 元·hm⁻²,显著高于其他三种处理。Y-OL和Y-OV处理牧草营养物质循环价值分别为1 537 元·hm⁻²和2 857 元·hm⁻²,占营养物质循环总价值的69.86%和78.88%,且二者之间存在显著差异。Y-OV处理营养物质循环总价值最高,为3 622 元·hm⁻²,是C-ON和Y-ON处理的5倍以上。

2.7 生物多样性价值

依据谢高地等^[9]的研究,水田生态系统和草甸生态系统生物多样性价值当量因子分别为0.21和1.27。《全国农产品成本收益资料汇编2019》显示,2018年

表4 不同处理水质净化价值

Table 4 Purification value of water quality in different treatments

处理 Treatment	渗水量 Water seepage volume/ (m ³ ·hm ⁻²)	时间间隔加权平均浓度 Time interval weighted average concentration/(mg·L ⁻¹)	修正系数 Correction coefficient	污水处理成本/(元·t ⁻¹) Wastewater treatment cost/ (yuan·t ⁻¹)	水质净化价值/(元·hm ⁻²) Water purification value/ (yuan·hm ⁻²)
C-ON	10 560	2.15±0.14a	1.00	0.55	5 808
Y-OL	10 560	1.53±0.09b	1.41	0.55	8 189
Y-OV	10 560	1.05±0.10c	2.05	0.55	11 906
Y-ON	10 560	1.23±0.07c	1.75	0.55	10 164

表6 不同处理营养物质循环价值(元·hm⁻²)

Table 6 Nutrient cycle value of different treatments(yuan·hm⁻²)

处理 Treatment	水稻秸秆营养物质循环价值 Rice straw nutrient recycling value	牧草营养物质循环价值 Forage nutrient cycle value	营养物质循环总价值 Total value of nutrient circulation
C-ON	587±52b	—	587±52c
Y-OL	663±44b	1 537±121b	2 200±82b
Y-OV	765±27a	2 857±152a	3 622±169a
Y-ON	660±68b	—	660±68c

云南省粳稻生产的净利润为1 287.75元·hm⁻²,因大理州主要粮食作物为水稻,所以粮食作物播种面积占作物播种总面积按100%计算,得 E_a 为1 287.75元·hm⁻²。C-ON和Y-ON处理无轮作,生物多样性价值仅包括水田生态系统,Y-OL和Y-OV处理生物多样性价值包括水田生态系统和草甸生态系统的价值。其中,C-ON和Y-ON处理生物多样性价值均为270元·hm⁻²,Y-OL和Y-OV处理生物多样性价值均为1 906元·hm⁻²,约为无轮作处理的7倍。

2.8 美学景观价值

依据谢高地等^[9]的研究,水田生态系统和草甸生态系统美学景观价值当量因子分别为0.09和0.56。C-ON和Y-ON处理景观美学价值均为116元·hm⁻²,Y-OL和Y-OV处理美学景观价值均为837元·hm⁻²,约为无轮作处理的7倍。

2.9 不同种植模式服务功能总价值

由表7可知,Y-OL和Y-OV处理的服务功能总价值分别为169 669元·hm⁻²和168 405元·hm⁻²,Y-ON处理的服务功能总价值为99 247元·hm⁻²。轮作处理服务功能总价值显著高于无轮作处理,但两个轮作处理之间无显著差异。无轮作处理中Y-ON处理服务功能总价值显著高于C-ON处理。与C-ON处理相比,Y-ON处理可提高农田生态系统服务功能总价值36.48%。与C-ON处理相比,增加冬季牧草轮作的Y-OL和Y-OV处理可提高农田生态系统服务功能价值131.59%~133.33%。与Y-ON处理相比,增加冬季牧草轮作的Y-OL和Y-OV处理可提高农田生态系统服务功能价值69.68%~70.96%。

3 讨论

本研究通过界定牛粪化肥配施水稻牧草轮作农田所产生的生态系统服务功能价值,将该种植模式的生态价值界定为农产品生产、气体调节、消纳废弃物、水质净化、土壤有机质累积、营养物质循环、维持生物多样性、提供美学景观8种。通过构建评估模型研究该种植模式单位(1 hm²)耕地面积与常规种植模式的生态价值量差异,为后续推广该模式提供理论支撑。

本研究结果表明,牛粪化肥配施水稻牧草轮作系统每公顷功能价值约为17万元,比牛粪化肥配施水稻单作系统高约7万元,比常规种植模式高约10万元。刘利花等^[30]对苏州市域稻田生态系统服务价值测算结果为稻田净价值约为7万元·hm⁻²,孙卫民等^[31]对不同复种模式稻田生态服务功能价值进行测算,结果表明复种后稻田生态价值约为17万~19万元·hm⁻²,本研究结果与前人研究结果基本一致。

3.1 施肥方式和轮作模式直接影响农田生态系统服务功能价值

农田生态系统消纳废弃物价值与施肥方式直接相关,优化施肥处理采用30%的牛粪替代化肥,不仅增加了畜禽粪便的利用效率,而且减少了畜禽粪便的处理成本,从而增加了农田生态系统消纳废弃物的价值。

农田生态系统服务功能价值中,农产品经济价值、气体调节价值、营养物质循环价值与作物产量密切相关。本研究结果表明Y-OL和Y-OV处理农产品经济价值显著高于Y-ON和C-ON处理,从作物产量

表7 不同种植生态系统服务功能总价值(元·hm⁻²)

Table 7 Total value of service functions of different planting ecosystems(yuan·hm⁻²)

处理 Treatment	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	服务功能总价值 Total value of service functions(E)
C-ON	53 067±4 321b	5 809±327b	0	5 808	7 060±2c	587±52c	270	116	72 717±4 648c
Y-OL	111 457±1 422a	12 194±133a	22 817	8 189	10 069±929a	2 200±82b	1 906	837	169 669±732a
Y-OV	105 823±8 702a	11 871±675a	22 817	11 906	9 622±468a	3 622±169a	1 906	837	168 405±9 890a
Y-ON	54 450±2 476b	5 933±318b	19 200	10 164	8 454±375b	660±68c	270	116	99 247±2 729b

来看,各处理稻谷产量无显著差异,水稻秸秆产量Y-OL处理显著高于其他3种处理,轮作处理农产品经济价值显著高于单作处理,主要来源于轮作牧草所产生的经济价值。轮作处理气体调节价值显著高于Y-ON和C-ON处理,主要原因是轮作牧草所带来的作物产量增加和作物生育期延长,直接导致轮作处理气体调节价值高于单作处理。Y-OL和Y-OV处理营养物质循环价值显著高于Y-ON和C-ON处理,这主要是由于轮作牧草使作物产量增加,进而使的营养物质循环价值增加。

农田生态系统的生物多样性价值和美学景观价值与种植作物有关。本研究结果表明,轮作处理生物多样性价值和美学景观价值约为单作处理的7倍,原因在于水稻-牧草轮作的种植方式提升了土地利用效率,同时增加了农田的生态系统类型,从而提高了生物多样性价值和美学景观价值。

3.2 施肥方式和轮作模式间接影响农田生态系统服务功能价值

农田生态系统水质净化价值与稻田下渗水氮素流失量有关。卢中辉等^[32]运用灰色关联分析方法,证明水稻种植和奶牛养殖对洱海水环境变化的关联度分别为0.69和0.74,化肥的过量施用、奶牛粪便的不合理处置对洱海水环境产生了严重的影响。本研究结果表明,优化施肥可显著提高农田生态系统的水质净化价值,其原因在于优化施肥处理下渗水TN时间间隔加权平均浓度显著低于常规施肥处理,有机肥、化肥的合理配施可提高作物对氮素的利用率,从而降低下渗水中氮素的流失量^[33],其次牛粪作为一种很好的有机肥料,其本身携带的各种微生物,有利于促进微生物与水稻根部的协同作用,减少氮素流失^[34]。

本研究结果表明,Y-OL、Y-OV和Y-ON处理土壤有机质积累价值显著高于C-ON处理,Y-OL和Y-OV处理土壤有机质积累价值显著高于Y-ON处理,其原因在于施肥方式和轮作模式影响农田土壤有机质的含量。有研究表明,牛粪与化肥配施能明显改善土壤理化性质,提高土壤孔隙度,增加土壤有机质含量^[35]。牧草轮作可促进土壤中营养元素的保持和转化,牧草根系能分泌大量有机物质促进微生物的生长发育,从而提高土壤中有机质含量^[36-37]。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)洱海流域70%化肥+30%牛粪-水稻-黑麦草

和70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苕种植模式下,稻田生态系统服务功能价值分别为169 669元·hm⁻²和168 405元·hm⁻²,70%化肥+30%牛粪-水稻-冬闲种植模式下,为99 247元·hm⁻²,均显著高于对照处理的72 717元·hm⁻²。

(2)稻田生态系统服务功能价值因施肥方式和轮作方式不同而改变。70%化肥+30%牛粪-水稻-黑麦草轮作和70%化肥+30%牛粪-水稻-紫花苕轮作的种植模式能有效提高稻田生态系统各项服务功能价值。

4.2 展望

本研究基于稻田生态系统服务功能,通过大田试验对牛粪化肥配施且水稻牧草轮作系统进行价值评估,揭示稻田系统施肥和种植模式改变所带来的生态价值变化的原因。结果表明,施肥方式和轮作模式的改变直接影响生态价值。不足的是,本研究仅对该模式进行短期的大田试验研究,在今后的研究中,可结合新的研究方法对该模式进行长期监测,研究其在长期持续种植条件下生态系统服务价值的变化。今后,应不断发掘新的服务价值及测算方式,完善其评价体系。生态系统服务功能价值的高低,是人类发展绿色可持续的重要体现,生态服务价值低的系统对生态的潜在影响更大。而合理的粪肥配施和稻田轮作有利于增加系统的生态价值,在未来的研究中应更注重化肥的减量配施和轮作制度的合理选择,使农业生产向更加绿色可持续发展的方向发展。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world, ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] 赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展[J]. *生态经济*, 2015, 31(8): 27-33. ZHAO H L. Research progress of classification and value evaluation of ecosystem services[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(8): 27-33.
- [3] 陈丹, 陈菁, 罗朝晖. 稻田生态系统服务及其经济价值评估方法探讨[J]. *环境科学与技术*, 2005, 28(6): 61-63, 112-113. CHEN D, CHEN J, LUO Z H. Study on paddy field ecosystem services and its economic valuation methods[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(6): 61-63, 112-113.
- [4] Sub-Global Assessment Selection Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Millennium Ecosystem Assessment sub-global component: Purpose, structure and protocols[EB/OL]. <http://www.millenniumassessment.org>.
- [5] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. XIE G D, LU C X, LENG Y F,

- et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.
- [6] 薛宝林, 张路方, 张铁亮, 等. 稻田生态系统服务价值评价——以湖南省为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 52-57. XUE B L, ZHANG L F, ZHANG T L, et al. Evaluation of paddy field eco-system's service value: Taking example Hunan Province for example[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(1): 52-57.
- [7] 盛婧, 陈留根, 朱善平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估[J]. 中国生态农业学报, 2008, 27(6): 1541-1545. SHENG J, CHEN L G, ZHU P P. Evaluation of ecological service value of rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 27(6): 1541-1545.
- [8] 唐衡, 郑渝, 陈阜, 等. 北京地区不同农田类型及种植模式的生态系统服务价值评估[J]. 生态经济, 2008(7): 56-59, 114. TANG H, ZHENG Y, CHEN F, et al. Ecosystem services valuation of difference croplands and cropping systems in Beijing suburb[J]. *Ecological Economy*, 2008(7): 56-59, 114.
- [9] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [10] 饶良懿, 朱金兆. 重庆四面山森林生态系统服务功能价值的初步评估[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 5-6, 44. RAO L Y, ZHU J Z. Evaluation of forest ecosystem services in Simian Mountain of Chongqing City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(5): 5-6, 44.
- [11] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484. XIAO H, OUYANG Z Y, ZHAO J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 481-484.
- [12] 薛达元, 包浩生, 李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 247-252. XUE D Y, BAO H S, LI W H. A valuation study on the indirect values of forest ecosystem in Changbaishan Mountain biosphere reserve of China[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(3): 247-252.
- [13] 吴玲玲, 陆健健, 童春富, 等. 长江口湿地生态系统服务功能价值的评估[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 411-416. WU L L, LU J J, TONG C F, et al. Valuation of wetland ecosystem services in the Yangtze River estuary[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 411-416.
- [14] 王寿兵, 王平建, 胡泽园, 等. 用意愿评估法评价生态系统景观服务价值——以上海苏州河为实例[J]. 复旦学报(自然科学版), 2003, 42(3): 463-467, 475. WANG S B, WANG P J, HU Z Y, et al. Assessing the landscape services value with contingent valuation method: A case study on Suzhou Brook, Shanghai City[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2003, 42(3): 463-467, 475.
- [15] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 黑河流域张掖地区生态系统服务恢复的条件价值评估[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 885-893. ZHANG Z Q, XU Z M, CHENG G D, et al. Contingent valuation of the economic benefits of restoring ecosystem services of Zhangye Prefecture of Heihe River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 885-893.
- [16] 鲁春霞, 谢高地, 成升魁. 河流生态系统的休闲娱乐功能及其价值评估[J]. 资源科学, 2001, 23(5): 77-81. LU C X, XIE G D, CHENG S K. Economic evaluation of river ecosystem service in recreation[J]. *Resources Science*, 2001, 23(5): 77-81.
- [17] 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 农田生态系统服务功能及其评价方法研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003(4): 267-270. ZHAO R Q, HUANG A M, QIN M Z, et al. Study on farmland ecosystem service and its valuation method[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003(4): 267-270.
- [18] 张东, 李晓赛, 陈亚恒. 怀来县农田生态系统服务价值分类评估[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 234-239. ZHANG D, LI X S, CHEN Y H. Classification evaluation on agriculture ecosystem service value of Huailai County[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 234-239.
- [19] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 等. 玛纳斯河流域农田生态系统服务功能价值评估[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1259-1264. ZHANG H F, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Evaluation of agricultural ecosystem services value in Manas River watershed of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1259-1264.
- [20] 叶延琼, 章家恩, 秦钟, 等. 佛山市农田生态系统的生态损益[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4593-4604. YE Y Q, ZHANG J E, QIN Z, et al. Ecological benefit-loss of agricultural ecosystem in Foshan City, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4593-4604.
- [21] 普燕爽, 王春雪, 陈建军, 等. 牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 286-294. PU Y S, WANG C X, CHEN J J, et al. Effects of different rotation patterns on nitrogen and phosphorus loss in paddy fields under an optimal ratio of cow manure and fertilizer[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 286-294.
- [22] 张鸣关, 曾国荣, 单贵莲, 等. 云南冬闲田栽培牧草营养价值综合评价[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(6): 140-143. ZHANG Y G, ZENG G R, SHAN G L, et al. Comprehensive evaluation of nutrition of forage grass cultivated in winter fallow field in Yunnan Province[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(6): 140-143.
- [23] 彭立, 杨振乾, 刘敏敏, 等. 大气污染物与绿化植物光合速率的关系研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1166-1170. PENG L, YANG Z Q, LIU M M, et al. Relationship between net photosynthetic rate of green plants and air pollutants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1166-1170.
- [24] 王淑彬, 王开磊, 黄国勤. 江南丘陵区不同种植模式稻田生态系统服务价值研究——以余江县为例[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(4): 636-642. WANG S B, WANG K L, HUANG G Q. A study on ecosystem service value of paddy fields in multiple cropping systems in southern hilly areas of China: Taking Yujiang County as an example[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(4): 636-642.
- [25] 李永涛, 杜振宇, 王霞, 等. 黄河三角洲自然保护区湿地生态服务

- 功能价值评估[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(5):761-768. LI Y T, DU Z Y, WANG X, et al. Evaluation of wetland ecosystem services in Yellow River delta nature reserve[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(5):761-768.
- [26] 杨滨娟, 黄国勤. 稻田冬种绿肥生态环境效应的研究进展[J]. 生态科学, 2016, 35(5):214-219. YANG B J, HUANG G Q. The research progress of winter green manure on ecological environment effects in paddy field[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(5):214-219.
- [27] 李福寿, 尹昌斌. 南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2):327-336. LI F D, YIN C B. Assessment of the functions and ecological services values of green manure in paddy fields in south China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2):327-336.
- [28] 吕玉虎, 郭晓彦, 李本银, 等. 翻压不同量紫云英配施减量化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5):94-98. LÜ Y H, GUO X Y, LI B Y, et al. Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and reducing chemical fertilizer on soil fertility and rice yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5):94-98.
- [29] 郑晓明, 杨庆文. 中国农业生物多样性保护进展概述[J]. 生物多样性, 2021, 29(2):167-176. ZHENG X M, YANG Q W. Progress of agricultural biodiversity conservation in China[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(2):167-176.
- [30] 刘利花, 尹昌斌, 钱小平. 稻田生态系统服务价值测算方法与应用——以苏州市域为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1):92-99. LIU L H, YIN C B, QIAN X P. Calculation methods of paddy ecosystem service value and application: A case study of Suzhou City[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(1):92-99.
- [31] 孙卫民, 黄国勤. 不同复种模式对双季稻田生态服务功能的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(6):1105-1111. SUN W M, HUANG G Q. Effects of different multiple cropping patterns on ecology service from double-cropping paddy field[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2012, 34(6):1105-1111.
- [32] 卢中辉, 余斌, 张辉, 等. 洱海流域农业面源污染与水环境变化的关联分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(2):215-223. LU Z H, YU B, ZHANG H, et al. Correlation analysis of agricultural non-point source pollution and water environment change in Erhai Lake watershed[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Science)*, 2017, 51(2):215-223.
- [33] 杨修一, 耿计彪, 于起庆, 等. 有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5):230-236. YANG X Y, GENG J B, YU Q Q, et al. Effects of organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer on transport characteristics of soil carbon and nitrogen in wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):230-236.
- [34] BITTMAN S, FORGE T A, KOWALENKO C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(4):613-623.
- [35] 聂佳如. 有机肥与化肥配施对土壤养分的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(9):52-55. NIE J R. Influence of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrients[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(9):52-55.
- [36] 董春华, 曾希柏, 文石林, 等. 湘南红壤丘陵区幼龄果园豆科牧草培肥效果研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5):1225-1236. DONG C H, ZENG X B, WEN S L, et al. Soil building effect of planting forage legumes in young orchard in hilly red soil regions, south Hunan, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5):1225-1236.
- [37] 还静, 刘芳, 陈震, 等. 不同种植方式对稻茬紫云英的生长及土壤养分的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9):2028-2034. HUAN J, LIU F, CHEN Z, et al. Effects of different planting methods on the growth and soil nutrients of Chinese milk vetch[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(9):2028-2034.