

马铃薯轮作的生态和经济效益——案例分析

于台泽^{1,2}, 贾良良³, 牛丽娟⁴, 王庆锁⁵, 李颖¹, 张丹^{1*}

(1. 大自然保护协会TNC, 北京 100600; 2. 中国农业大学, 北京 100083; 3. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050051; 4. 雪川农业发展股份有限公司, 河北 张家口 076481; 5. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 马铃薯是中国重要的粮食作物之一, 在中国西南山区、西北、内蒙古自治区和东北都有广泛的种植。但是随着种植面积、种植投入的不断加大, 马铃薯种植业面临着很多挑战, 如病虫害控制难度加大、产量下降以及土壤健康状况降低。马铃薯与不同作物轮作是解决马铃薯多种种植问题的有效方法之一, 不仅可以很大程度地保护土壤健康, 而且可以有效增加马铃薯的品质与产量。运用成本-效益分析的方法, 利用收集到的马铃薯单作和与其他作物轮作的文献数据, 从生态效益与经济效益两方面对马铃薯与其他作物轮作进行了分析。结果发现, 马铃薯轮作可获得的经济和生态效益与连作相比多 12 571 元/hm²。此外, 通过田间案例分析发现, 在一年一作条件下, 马铃薯三年轮作无论是在经济效益还是生态效益方面都比马铃薯两年轮作高。在两年轮作模式中, 马铃薯-黑麦-燕麦(PROPRO)这种两年三季的轮作模式, 与同为两年轮作模式的一年一作相比, 经济效益提高了 158.88%, 且单位产量的碳排放降低了 24.91%, 同时实现冬季地表覆盖, 减少土壤侵蚀, 与传统一年一作相比是一种经济和生态双赢的轮作模式。

关键词: 马铃薯; 轮作; 生态效益; 经济效益

Ecological and Economic Benefits of Potato Rotation: a Case Study

YU Taize^{1,2}, JIA Liangliang³, NIU Lijuan⁴, WANG Qingsuo⁵, LI Ying¹, ZHANG Dan^{1*}

(1. The Nature Conservancy (TNC), Beijing 100600, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Institute of Agro-resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050051, China; 4. Snow Valley Agricultural Development Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 076481, China; 5. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Potato is one of the important food crops in China, and widely planted in mountainous areas of Southwest, Northwest, Inner Mongolia Autonomous Region and Northeast. However, as the planting area and planting investment continue to increase, the potato planting industry has encountered several widespread challenges, such as increasing difficulty in controlling pests and diseases, declining yields, and decreasing soil health. Rotating potatoes with different crops are one effective solution to simultaneously address multiple challenges in potato production, which can not only maintain soil health to a large extent, but also effectively increase potatoes' quality and yield. By using the method of cost-benefit analysis and the collected literature data of potato monoculture and rotation with other crops, the ecological and economic benefits of potato rotation with other crops were analyzed. It was found that compared with continuous cropping, the economic and ecological benefits obtained by potato rotation were 12 571 Yuan/ha more.

收稿日期: 2020-09-23

基金项目: 大自然保护协会TNC-先正达“中国干旱与半干旱区可持续农业示范项目”(P118870)。

作者简介: 于台泽(1999-), 男, 本科生, 研究方向为农业经济与农业可持续发展。

*通信作者(Corresponding author): 张丹, 博士, 主要从事农业可持续发展研究, E-mail: dan.zhang@tnc.org。

Additionally, through field cases, it was found that under the condition of one crop per annual, three-year potato rotation was higher than potato two-year rotation in terms of economic and ecological benefits. In two-year potato rotation, compared with one crop per annual, the potato-rye-oat (PROPRO) three-crops in two years increased economic benefit by 158.88% and reduced the carbon emissions per unit yield by 24.91%. Meanwhile, it achieved winter surface cover and reduced soil erosion, so compared with the traditional one crop per annual, three-crops in two years has benefits in both economic and ecological areas.

Key Words: potato; crop rotation; ecological benefit; economic benefit

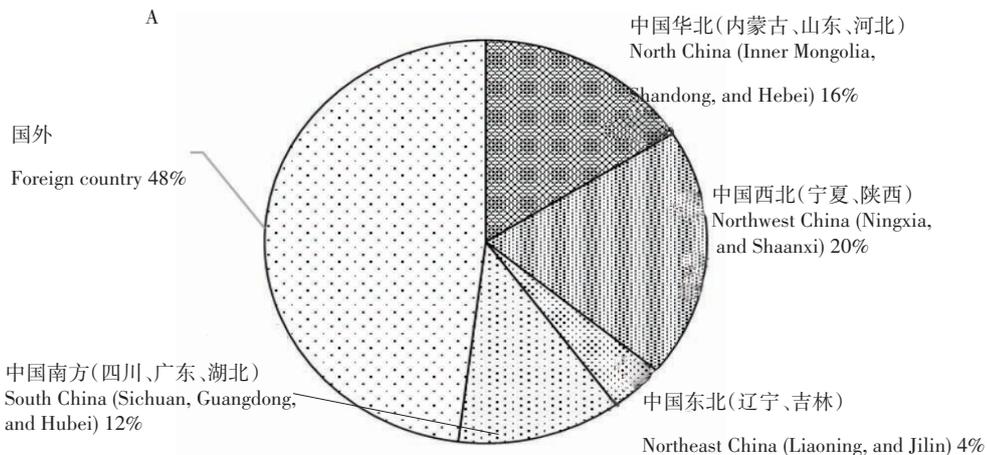
马铃薯是中国重要的粮食作物, 近年播种面积和产量都迅速扩大, 其中播种面积从2000年的472.3万hm²增加到2015年的551.8万hm², 产量从2000年的1 325.5万t增长至2015年的1 897.2万t^[1]。2015年, 为满足国家粮食安全的需求, 农业部提出了“马铃薯主粮化战略”, 进一步推动了马铃薯产业的快速发展, 马铃薯在中国粮食中所占的地位不断攀升, 规模化和集约化种植程度不断提高。近年来的研究发现, 随着马铃薯集约化种植程度的不断提高, 马铃薯连作导致的土传病害日趋严重, 产量、品质下降问题十分突出^[2], 严重制约了马铃薯产业的可持续健康发展。

轮作是指在同一田地上按一定顺序连续种植不同作物的方法, 这与高度集约化的单一连作模式相反。国内外已有大量试验证明轮作对马铃薯生产有巨大生态和经济效益, 是实现农业可持续发展的必由之路^[3]。本研究总结马铃薯轮作的相关文献并结合实地案例, 对马铃薯的轮作效益进行分析, 以期对未来马铃薯产业的健康发展提供帮助。

1 材料与方法

1.1 马铃薯轮作及连作成本-效益数据库的构建

为便于量化马铃薯轮作的生态效益和经济效益, 本研究收集国内外文献, 运用成本-效益分析(Cost-benefit analysis, CBA)的方法, 从不同效益角度建立马铃薯轮作效益参数库, 以此量化马铃薯轮作种植的生态效益和经济效益, 并将生态效益和经济效益指标进行了货币化以便更加综合、直观地分析问题。搜集到的文献资料主要来自CNKI中文文献数据库, Web of science数据库及Google scholar数据库, 文献数据分布如图1所示, 其中图1A为文献试验地点分布, 图1B为文献中与马铃薯轮作作物种类分布。本研究共选取13项指标, 其中经济效益指标6项, 包括病虫害发生率、水分利用率、平均年需氮量、平均年需磷量、平均年需钾量以及产量; 生态效益指标7项, 包括碳足迹、土壤有机质、土壤总氮、土壤微生物碳与氮、土壤细菌与真菌比值(细菌/真菌)及土壤



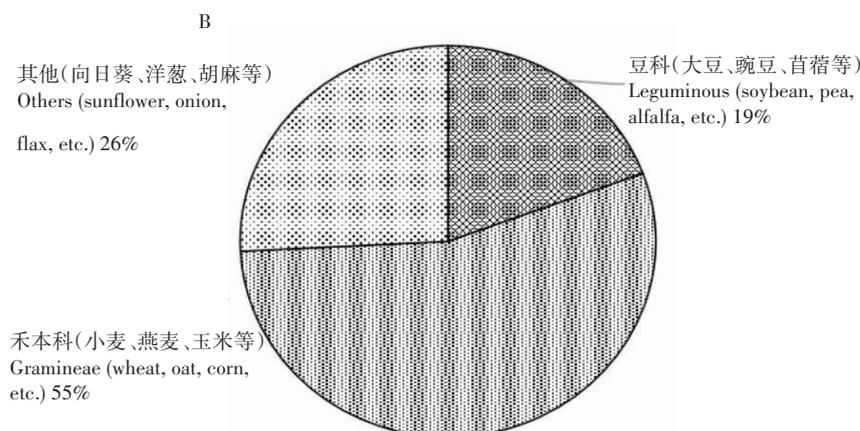


图1 马铃薯轮作与连作效益对比文献数据来源分布

Figure 1 Distributions of literature data sources for comparison of benefits of potato rotation and continuous cropping

酶活性。在对搜集到的文献资料分析整理的基础上进行了数据提取, 组成了马铃薯轮作及连作成本-效益数据库。把文献收集所得出的马铃薯经济及生态效益参数, 运用至实地案例分析当中, 并通过比较不同轮作组合的成本收益, 得出对不同轮作组合在案例地区的效益。

1.2 马铃薯轮作及连作成本-效益分析

在马铃薯轮作及连作的成本-效益分析方法中, 经济效益包括因病虫害发生率减小所导致的农药效益、因水分利用提高所导致的灌溉效益、因需肥量减少所导致的施肥效益以及因产量提高所产生的产值效益; 生态效益主要包括碳足迹减少所产生的温室气体减排效益, 其中碳足迹是指粮食生产的净碳排放, 即碳排放与碳固定量的差值^[4,5]。通过检索国内外田间试验条件下马铃薯轮作(大豆、小麦、燕麦等)与连作试验的相关文献^[6-30], 统计了两种种植模式下不同效益的平均值、最小值和最大值(表1), 其中水分利用率计算方式为作物产量除以耗水量, 碳足迹的计算公式为单位产量碳足迹乘以每公顷的产量。

马铃薯轮作的总效益货币值的计算方法为: 首先根据所收集数据, 计算两种种植模式下各效益指标的变幅, 得到轮作后不同效益的增长百分比。根据所得增长百分比或直接文献检索^[31,32]到的效益增幅, 将其与《全国农产品成本收益资料汇编

2019》^[33]中河北省马铃薯相关数据结合计算, 并将各项效益指标进行货币化转换后加和, 得出马铃薯轮作的总效益货币值。农药效益即农药需求减少百分比与农药费的乘积; 灌溉效益即水分利用率提高百分比与灌溉费的乘积; 施肥效益数据来源于文献检索^[32]; 产值效益即产量增加百分比与马铃薯产值的乘积; 温室气体减排效益为碳足迹减少量与二氧化碳成交价格的乘积。

将上述计算所得的各项指标以雷达图进行展示, 将指标进行分类: 病虫害发生率、水分利用率、平均年需氮量、平均年需磷量、平均年需钾量以及产量为经济效益指标, 碳足迹、土壤有机质、土壤总氮、土壤微生物碳与氮及土壤细菌/真菌为生态效益指标。但由于各指标间量纲不同, 需要对各原始数值进行一致化处理, 其中病虫害发生率、碳足迹、平均年需氮量、平均年需钾量以及平均年需磷量为逆向指标, 这些指标的数据越大则代表相关优势越低, 因此需将逆向指标进行倒数一致化:

$$x_{ij} = \frac{1}{m_{ij}}$$

式中, x_{ij} 为第 i 个被评价对象在第 j 个指标上的一致化数值, m_{ij} 为第 i 个被评价对象在第 j 个指标上的原始数据。为了将所有数值控制在区间[0, 1], 需将数据根据公式进行归一化处理^[34]:

表1 马铃薯轮作及连作经济效益和生态效益参数

Table 1 Parameters of economic and ecological benefits of potato rotation and continuous cropping

项目 Item	单位 Unit	轮作效益 Rotation benefit	
		连作 Continuous cropping	轮作 Rotation
病虫害发生率 ^[4,5] Incidence rate of pests and diseases	%	57.31(54.30, 80.32)	22.40(6.80, 38.00)
水分利用率 ^[8-12] Water use efficiency	kg/mm·hm ²	73.22(66.54, 81.39)	91.23(88.42, 94.23)
平均年需氮量 ^[13-15] Average annual nitrogen demand	kg/hm ²	235.00	146.92(128.84, 165.00)
平均年需磷量 ^[16-18] Average annual phosphorus demand	kg/hm ²	38.09	28.85(26.89, 30.81)
平均年需钾量 ^[13,18,19] Average annual potassium demand	kg/hm ²	336.00	205.54(204.00, 207.07)
年产量 ^[6,16,20-22] Average annual yield	kg/hm ²	25 263.88(13 579.95, 34 469.10)	33 313.48(18 174.95, 50 168.00)
碳足迹 ^[23,24] Carbon footprint	kg CO ₂ eq/hm ²	22 569.90	14 435.92(13 708.43, 15 163.41)
土壤微生物碳 ^[7,25,26] Soil microbial carbon	mg/kg	200.80(173.80, 249.00)	326.81(191.00, 557.00)
土壤微生物氮 ^[7,25,26] Soil microbial nitrogen	mg/kg	55.14(2.43, 112.00)	189.08(5.23, 507.00)
土壤细菌/真菌(B/F) ^[25,27] Bacteria/fungi	10 ²	1.76(1.58, 1.88)	5.75(3.45, 9.83)
土壤有机质 ^[7,28] Soil organic matter	g/kg	23.00(21.00, 25.00)	25.50(23.00, 28.00)
土壤全氮 ^[21,28,29] Soil total nitrogen	g/kg	4.15(1.60, 8.14)	5.20(1.80, 10.80)
土壤酶活性 ^[13,30] Soil enzyme activity	mg×10 ⁻² /g 或 mL/g	脲酶活性: 250.80 mg×10 ⁻² /g (36.71 mg×10 ⁻² /g, 590.80 mg×10 ⁻² /g) 过氧化氢酶活性: 1.69 mL/g (1.02 mL/g, 3.76 mL/g) 多酚氧化酶活性: 25.82 mg×10 ⁻² /g (2.37 mg×10 ⁻² /g, 70.38 mg×10 ⁻² /g)	脲酶活性: 280.44 mg×10 ⁻² /g (37.24 mg×10 ⁻² /g, 681.00 mg×10 ⁻² /g) 过氧化氢酶活性: 1.69 mL/g (1.02 mL/g, 3.80 mL/g) 多酚氧化酶活性: 28.25 mg×10 ⁻² /g (4.10 mg×10 ⁻² /g, 75.38 mg×10 ⁻² /g)

注: 病虫害发生率包括黑痣病、黄萎病; 水分利用率、马铃薯需肥量以及碳足迹数据以马铃薯-小麦, 马铃薯-大豆以及马铃薯-大豆-小麦为例计算; 其余指标计算包含马铃薯与燕麦、小麦、豌豆等轮作数据。

Note: Incidence of pests and diseases includes black scurf and *verticillium* wilt; water use efficiency, potato fertilizer requirement and carbon footprint data are calculated by using potato-wheat, potato-soybean and potato-soybean-wheat as examples. Calculation of other indicators includes potato rotation with oats, wheat and peas, etc.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

式中, y_{ij} 为第 i 个被评价对象在第 j 个指标上归一化后的数值, x_{ij} 为一致化后数据。

1.3 河北省张家口察北管理区马铃薯轮作案例分析

1.3.1 马铃薯轮作案例分析情况

2018年开始, 在位于河北省张家口市察北管理区的雪川农业集团试验田内建立了马铃薯轮作示范基地, 将轮作作物(燕麦、小麦、大豆等)纳入马铃薯的生产过程中, 并对不同轮作组合进行对比, 以量化的科学数据分析农户轮作的可行性, 多维度分析作物经济和生态效益的变化。

察北管理区位于河北省张北县, 地处河北省西北部坝上地区, 因海拔和纬度高, 气候冷凉, 无霜期短, 空气干燥, 日照充足, 昼夜温差大, 病虫害发生少, 非常适合马铃薯生长, 且马铃薯退化慢, 有利于种薯繁育, 是全国优质马铃薯种薯和商品薯生产基地。试验田所在位置经纬度为 N 45°51', E 115°99', 面积 3.47 hm²。

轮作模式试验从2018年开始, 设6种马铃薯种植方案, 分别为两年轮作: 马铃薯-春小麦(PWPW)、马铃薯-燕麦(POPO)、马铃薯-大豆(PSPS); 三年轮作: 马铃薯-春小麦-燕麦(PWOP)、马铃薯-燕麦-大豆(POSP); 以及马铃薯连作。另外, 利用试验数据, 将一种特殊的两年轮作模式纳入分析, 因为黑麦能够在冬季种植, 因此能够进行马铃薯-单播冬性黑麦+复播短生育期燕麦(PROPRO)轮作模式, 即在同年9月至次年5月种植黑麦, 次年6~10月种植燕麦。总计7种马铃薯种植方案, 具体措施见表2和表3。

试验田距离雪川厂区2 km, 在2018年之前已连续种植马铃薯3年, 其中每个轮作组合占地0.67 hm², 马铃薯连作占地0.13 hm², 地块分布为两年轮作与三年轮作交替排列。马铃薯品种为‘中薯4号’, 试验过程中使用喷灌的方式进行灌溉, 马铃薯以525 kg/hm²复合肥(N:P₂O₅:K₂O = 12:19:16)为底肥, 用195 kg/hm²尿素(N, 46%)与75 kg/hm²硝酸钾(N:P₂O₅:K₂O = 13:0:46)进行追肥, 其余轮作作物以磷酸二铵(N:P₂O₅:K₂O = 18:46:0)为底肥, 以尿

表2 不同马铃薯轮作模式试验处理

Table 2 Experimental treatments of different potato rotation patterns

种植模式 Planting pattern	项目 Item	处理 Treatment
两年轮作 Two-year rotation	马铃薯-春小麦(PWPW)	马铃薯于5月播种,9月收获;春小麦于4月播种,8月收获。
	马铃薯-燕麦(POPO)	马铃薯于5月播种,9月收获;燕麦于5月播种,9月收获。
	马铃薯-大豆(PSPS)	马铃薯于5月播种,9月收获;大豆于5月播种,10月收获。
	马铃薯-黑麦/燕麦(PROPRO)	马铃薯于5月播种,9月收获;黑麦于9月播种,5月收获;燕麦于6月种植,10月收获。
三年轮作 Three-year rotation	马铃薯-春小麦-燕麦(PWOP)	马铃薯于5月播种,9月收获;春小麦于4月播种,8月收获;燕麦于9月播种,5月收获。
	马铃薯-燕麦-大豆(POSP)	马铃薯于5月播种,9月收获;燕麦于5月播种,9月收获;大豆于5月播种,10月收获。
连作 Continuous cropping	马铃薯连作(PPPP)	马铃薯收获后不种植任何作物,第2年连作种植。

表3 试验田轮作种植方案
Table 3 Rotation planting plan of experimental field

轮作组合 Type of rotation	种植模式 Planting pattern	第1年 Year one	第2年 Year two	第3年 Year three	第4年 Year four
两年轮作 Two-year rotation	PWPW	马铃薯	春小麦	马铃薯	春小麦
	POPO	马铃薯	燕麦	马铃薯	燕麦
	PSPS	马铃薯	大豆	马铃薯	大豆
	PROPRO	马铃薯	黑麦/燕麦	马铃薯	黑麦/燕麦
三年轮作 Three-year rotation	PWOP	马铃薯	春小麦	燕麦	马铃薯
	POSP	马铃薯	燕麦	大豆	马铃薯
连作 Continuous cropping	PPPP	马铃薯	马铃薯	马铃薯	马铃薯

素进行追肥。

1.3.2 成本收益数据来源

马铃薯连作相关成本收益及生态效益数据来自《全国农产品成本收益资料汇编 2019》^[33]以及《2019年张北县马铃薯轮作项目作物产量效益及品质总结》。马铃薯轮作后相关成本收益及生态效益数据根据上文所计算的效益参数进行计算(包括产量的提升比率以及因农药、灌溉和化肥减少所产生的成本降低), 轮作马铃薯产值即连作马铃薯产值与产量提升比例的乘积, 轮作马铃薯的直接成本即连作马铃薯成本减去参数中因农药、灌溉和化肥减少取得的效益值; 春小麦、大豆的成本收益数据来自《全国农产品成本收益资料汇编 2019》^[33]中河北省数据; 其余燕麦、黑麦成本收益以及作物碳足迹数据均来源于文献检索^[23,35,36], 每公顷碳足迹二氧化碳当量即每千克碳足迹二氧化碳当量与每公顷作物产量的乘积, 构建不同种类作物每年的成本收益以及生态效益(表4)。在成本收益中, 净利润即产值减去总成本, 其中总成本为生产成本(包括物质与服务费用与人工成本)与土地成本之和; 在生态效益当中, 碳足迹成本为二氧化碳当量与二氧化碳交易价格的乘积; 生态效益折现为马铃薯连作碳足迹成本与马铃薯轮作碳足迹成本的差值。最后, 通过叠加的方法计算不同种植模式的成本收益以及生态效益, 建立

表格并进行比较。表格中, 直接费用包括种子费、化肥费、农家肥费、农药费、农膜费、租赁作业费、燃料动力费、技术服务费、工具材料费、修理维护费和其他直接费用; 间接费用包括固定资产折旧、保险费、管理费、财务费以及销售费; 土地成本为当地流转地租金, 合计效益为净利润与生态效益折现的总和。

1.4 数据处理

所有数据导入 Microsoft Excel 2016 进行计算、制图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯轮作及连作经济效益和生态效益

马铃薯轮作经济效益和生态效益增幅见表5。马铃薯轮作与连作相比, 经济效益与生态效益均有不同程度的提高。在经济效益方面, 马铃薯病虫害发生率如黑痣病、黄萎病等显著降低, 能够有效降低农药的使用, 节省 119 元/hm²的农药成本; 通过轮作, 马铃薯的水分利用率也会提高 24.60%, 从而节省 58 元/hm²的灌溉成本; 需肥量的减少能够有效降低化肥的施用量, 从而节约 4 500 元/hm²的化肥成本; 通过轮作, 马铃薯的产量也能够提升 31.86%, 从而增加 5 921 元/hm²的收入。在生态效益方面, 轮作同样会带来效益, 如土壤碳、氮, 土壤微生物碳、氮以及土壤酶活

表4 不同作物经济效益指标原始数据
Table 4 Raw data of economic benefit indicators for different crops

效益 Benefit	项目 Item	单位 Unit	作物 Crop					
			连作马铃薯 Continuous potato	轮作马铃薯 Rotation potato	燕麦 Oats	春小麦 Wheat	大豆 Soybean	黑麦 Rye
	产量	kg/hm ²	30 270	39 869	4 125	5 760	2 340	83 235
	产值	元/hm ²	30 795	40 551	9 900	14 085	11 955	25 800
	总成本	元/hm ²	25 770	21 093	10 108	16 805	13 115	13 085
	生产成本	元/hm ²	22 420	17 743	6 758	13 455	9 765	9 735
经济效益 Economic benefit	物质与服务费用	元/hm ²	17 524	12 847	6 758	7 335	3 345	4 845
	直接费用	元/hm ²	15 204	10 527	6 758	7 185	3 285	4 845
	间接费用	元/hm ²	2 320	2 320	0	150	60	0
	人工成本	元/hm ²	4 896	4 896	75	6 120	6 420	4 890
	土地成本	元/hm ²	3 350	3 350	3 350	3 350	3 350	3 350
	净利润	元/hm ²	5 025	19 458	-283	-2 720	-1 160	12 715
	生态效益 Ecological ben- efit	碳足迹	kg CO ₂ eq/hm ²	24 210	34 830	1 568	2 880	-120

注: 连作马铃薯数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编 2019》^[33]以及《2019年张北县马铃薯轮作项目作物产量效益及品质总结》, 轮作马铃薯产量为连作马铃薯产量与上文所得马铃薯产量增加百分比相乘得出, 轮作马铃薯直接费用为连作马铃薯直接费用扣除因轮作所致的成本减少(农药费用、化肥费用以及灌溉费用), 其余作物数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编 2019》^[33]。

Note: Data of continuous cropping potatoes come from Compile of Cost-Benefit Data of Agricultural Products in 2019^[33] and Summary of Crop Yield, Benefit and Quality in 2019 Zhangbei County Potato Rotation Project. Yield of rotation potato is obtained by multiplying continuous cropping potato yield and percentage increase in potato yield obtained above. Direct cost of potato rotation is direct cost of continuous cropping potato minus cost reduction due to crop rotation (pesticide costs, fertilizer costs and irrigation costs). The other crop data comes from Compile of Cost-Benefit Data of Agricultural Products in 2019^[33].

性, 马铃薯轮作与连作相比均有提高, 这意味着土壤肥力的有效提高。另外轮作体系的碳足迹远低于连作, 根据欧洲能源交易所碳交易价格折合碳交易成本, 能够提供 1 973 元/hm²的效益。总的来说, 经过将不同的经济效益和生态效益货币化加和后发现, 轮作与单做相比可多获得 12 571 元/hm²的经济和生态效益(其中生态效益仅包含碳减排效益)。

2.2 马铃薯轮作及连作经济效益和生态效益综合评价

根据以上对关于马铃薯轮作文献的检索以及数据的归一化处理, 得出马铃薯轮作与连作的经济效益和生态效益的雷达图(图 2)。

在经济效益方面, 马铃薯轮作与连作相比, 病虫害发生率降低的幅度最大(图 2A)。在生态效益方面微生物碳、氮, 土壤细菌/真菌以及 GHGs

表5 马铃薯轮作经济效益和生态效益增幅参数
Table 5 Summary of increase in economic and ecological benefits of potato rotation

项目 Item	轮作效益 Rotation benefit		轮作效益折价(元/hm ²) Rotation benefit converted into money (Yuan/ha)
	单位 Unit	平均值 Average	
病虫害发生率下降 Decrease in incidence of pests and diseases	%	60.91(87.48,37.00)	119
水分利用率提升 Increase in water use efficiency	%	24.60(8.64,41.61)	58
经济效益 Economic benefit			
平均年需氮量减少 Decrease of average annual nitrogen demand	%	37.48(29.79,45.17)	
平均年需磷量减少 Decrease of average annual phosphorus demand	%	24.26(19.11,29.40)	4 500
平均年需钾量减少 Decrease of average annual potassium demand	%	38.83(38.37,39.29)	
平均年产量增加 Increase of average annual yield	%	31.86(9.12,48.25)	5 921
生态效益 Ecological benefit			
碳足迹减少 Decrease in carbon footprint	%	37.08(36.04,39.26)	1 973
土壤微生物碳增加 Increase of soil MBC	%	62.75(9.90,123.69)	
土壤微生物氮增加 Increase of soil MBN	%	242.91(9.80,352.68)	
土壤细菌/真菌增加 Increase of bacteria/fungi	%	226.70(83.51,437.16)	
土壤有机质提升 Improvement of soil organic matter	%	10.87(9.52,12.00)	
土壤全氮提升 Improvement of soil total nitrogen	%	24.70(11.11,32.68)	
		脲酶活性 11.82(1.44,15.27)	
土壤酶活性增加 Increase of soil enzyme activity	%	过氧化氢酶活性 0.59(0,1.06)	
		多酚氧化酶活性 9.41(7.11,73.31)	
总效益 Total benefit	元/hm ²	-	12 571

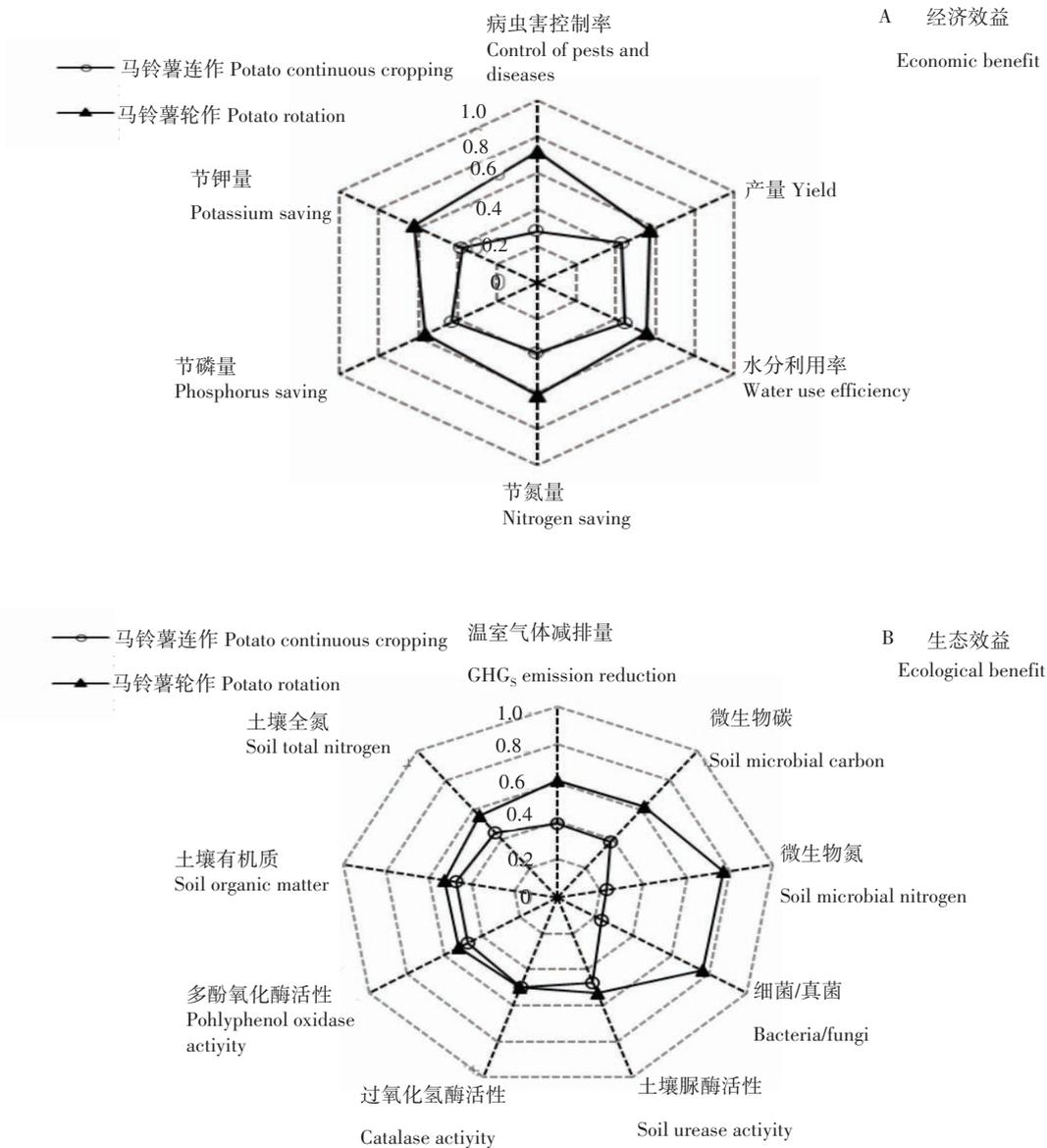
减排量均明显上升, 土壤酶活性的上升不是十分明显(图2B)。

2.3 案例描述

对7种植植模式进行成本收益分析, 不同作物经济效益指标原始数据见表4, 种植模式经济

效益和生态效益比较结果见表6。

利用上文所得参数进行计算发现, 轮作马铃薯的产量比连作提升31.86%, 且直接成本如农药费、灌溉费以及化肥费用等减少4 677元/hm²。从表6中可以看出, 轮作与连作相比, 平均每年可



病虫害控制率、GHGs减排量、节氮量、节钾量以及节磷量为病虫害发生率、碳足迹、平均年需氮量、平均年需钾量以及平均年需磷量统一取值方向后指标名称。

Control of pests and diseases, GHGs emission reduction, nitrogen saving, potassium saving, and phosphorus saving are indicator name of pest and diseases incidence, carbon footprint, average annual nitrogen demand, average annual potassium demand, and average annual phosphorus demand after unifying values' direction.

图2 马铃薯轮作与连作的经济效益和生态效益比较

Figure 2 Comparison of economic and ecological benefits of potato rotation and continuous cropping

表 6 马铃薯不同种植模式经济效益和生态效益比较(每4年)

Table 6 Comparison of economic and ecological benefits of different potato planting methods (every four years)

效益 Benefit	项目 Item	单位 Unit	轮作 Rotation						平均 Average	连作 Continuous cropping PPPP
			两年轮作 Two-year rotation				三年轮作 Three-year rotation			
			PWPW	POPO	PSPS	PROPRO	PWOP	POSP		
	产量	kg/hm ²	81 659	78 389	74 819	244 859	80 024	76 604	106 059	121 080
	产值	元/hm ²	99 516	91 146	95 256	142 746	95 331	93 201	102 866	123 180
	总成本	元/hm ²	80 473	67 079	73 093	86 549	73 776	70 086	75 176	103 080
	生产成本	元/hm ²	67 073	53 679	59 693	73 149	60 376	56 686	61 776	89 700
经济效益 Economic benefit	物质与服务费用	元/hm ²	45 041	43 887	37 061	53 577	44 464	40 474	44 084	70 140
	直接费用	元/hm ²	40 101	39 247	32 301	48 937	39 674	35 774	39 339	60 840
	间接费用	元/hm ²	4 940	4 640	4 760	4 640	4 790	4 700	4 745	9 300
	人工成本	元/hm ²	22 032	9 942	22 632	19 722	15 987	16 287	17 767	19 560
	土地成本	元/hm ²	13 400	13 400	13 400	13 400	13 400	13 400	13 400	13 380
	净利润	元/hm ²	19 043	23 917	22 163	56 197	21 480	23 040	27 640	20 100
生态效益 Ecological benefit	碳足迹成本	元/hm ²	15 312	14 692	13 894	34 364	15 002	14 293	17 926	22 883
	生态效益折现	元/hm ²	7 571	8 191	8 989	-11 481	7 881	8 590	4 957	-
	综合效益	元/hm ²	26 614	32 108	31 152	44 716	29 361	31 630	32 597	20 100

注: 以上指标的数值描述是四年不同种植模式的效益。各指标数据来源见表4。

Note: Values of the above indicators describe benefits of different planting patterns over four years. Data sources of each indicator can be seen in table 4.

获得 3 124(1 629~6 154)元/hm²的经济和生态(仅包含碳足迹)效益。马铃薯连作模式综合效益比轮作模式低 38.33%, 并且其无论从经济效益来看还是从生态效益来看都不具备优势, 其年净利润 5 025元/hm², 远低于马铃薯轮作平均 8 149元/hm², 仅为其 61.66%, 并且其年碳足迹成本高昂, 为 5 721元/hm², 比马铃薯轮作(平均 4 482元/hm²)高 27.64%。

将不同的轮作模式进行比较, 其中, 同为一年一作模式的三年轮作与两年轮作相比, 其无论

是在经济效益还是生态效益方面都比两年轮作高。但是若在两年轮作模式中加入 PROPRO 这种两年三季的轮作模式, 发现两年轮作的年净利润平均为 7 583元/hm², 三年轮作年净利润平均为 5 565元/hm², 两年轮作年净利润比三年轮作高 36.26%。两年轮作年碳足迹成本为 4 891元/hm², 而三年轮作年碳足迹成本为 3 670元/hm², 三年轮作碳足迹成本比两年轮作低 24.96%。这是因为虽然两年轮作模式下两年三作比一年一作的经济效率提高了 158.88%, 但是因为复种指数的增加,

作物年单位面积的碳排放有所增加(134.84%), 不过, 正因为复种指数增加带来了作物年单产增加, 单位产量的碳排放降低了24.91%。

3 讨论

虽然关于马铃薯相关轮作效益的研究很多, 但是大多数的研究仅局限于土壤及作物本身, 选取的评价指标往往仅局限于土壤理化性质、作物产量等^[6-22,25-30], 主要体现在病虫害发生率降低, 平均年需氮、钾、磷减少, 产量上升、土壤全氮提高以及水分利用率提高等方面。如宋佳承等^[37]在西北干旱地区的试验结论指出, 通过与藜麦、玉米等作物轮作后, 土壤 pH 明显升高, 土壤有机质、碱解氮、有效磷等含量显著增加, 且细菌与真菌数量比值、土壤酶活性显著提高, 生态环境得到有效改善。胡新元等^[38]在半干旱区的试验结果显示, 轮作较连作处理显著增加了土壤有效磷和全氮的含量, 并且全氮与马铃薯产量呈显著正相关。Wright 等^[7]在新西兰奥克兰的试验中发现马铃薯与洋葱轮作的土壤有机质含量比连作提升 12%, 土壤氮含量提升 11%。可见, 马铃薯轮作在各个方面均优于马铃薯连作, 经济效益明显。与此同时, 轮作所带来的生态效益不可忽视, 轮作虽然并没有使直接种植收益显著提升, 但却能够通过改善土壤健康状况而减少水、肥等种植成本投入^[32,39], 间接增加农民的净收益。从本研究的结果可以发现, 与单作相比, 马铃薯轮作的优势主要体现在碳足迹降低和土壤微生物丰度提升两方面, 能为国家实现二氧化碳等温室气体的减排目标做出贡献^[40]。综合比较, 轮作与单作相比可多获得 12 571 元/hm²的经济和生态效益。

在冀西北等干旱地区, 马铃薯轮作能够很大程度上提升土壤有机质和氮的含量^[37]。实地案例分析可以发现, 当同时考虑生态与经济的综合效益时, 在冀西北地区马铃薯连作不具备优势^[41], 其综合效益比轮作低 38.34%。将一年一作条件下不同的轮作模式进行比较, 发现马铃薯三年轮作(一年一作)无论是在经济效益还是生态效益方面都比马铃薯两年轮作(一年一作)高。值得注意的是, 在两年轮作模式中, 马铃薯-黑麦草/燕麦

(PROPRO)这种两年三季的轮作模式, 由于能够充分利用冬季的种植时间, 与同为两年轮作模式的一年一作相比, 经济效益提高了 158.88%。虽然作物单位面积的碳排放有所增加(134.84%), 但是由于复种指数增加带来了作物年单产增加, 单位产量的碳排放降低了 24.91%。同时由于冬季土壤覆盖, 减少了风蚀和水分无效蒸发, 轮作系统的生态效益得以提升, 因此这是一种兼顾经济与生态双赢值得推广的轮作模式。

虽然本研究通过现有文献的收集选取了多种经济和生态效益指标量化轮作效益, 但是由于现有研究的限制, 并没有把所有的指标计算在内, 如减少土壤养分流失、土壤侵蚀、农田产流量等, 增加上述指标的分析所得到的生态效益将会更大, 如轮作不仅可以通过减少土壤养分的流失解决水体富营养化的问题^[42], 也可以减少农田产流量和土壤侵蚀量, 保持土壤的健康^[43], 这些生态指标的改善往往会带来环境的改善, 减少用于治理环境问题所产生的巨量成本^[42]。但在现有的马铃薯轮作研究中, 虽然有对这些指标的定性分析, 但是很少有人关注这些指标的量化分析, 及其变化产生的环境治理成本变化的关系^[42]。因此在未来的相关研究中, 研究人员应加强关注土壤侵蚀量、养分流失量、水体富营养化程度等生态效益指标变化的定量分析, 从而量化因这些指标的改善带来的用于治理环境问题所产生的成本减少, 从而更全面、准确地对马铃薯轮作效益进行评价。另外, 无论是田间试验还是文献研究都发现, 马铃薯两年三作等多熟的轮作方式可以在提升农民收益的同时减少土壤侵蚀、控制水土流失等从而提升生态效益^[44,45], 但目前对于马铃薯多熟制轮作模式的探索研究非常少尤其是在北方地区, 因此在今后的研究过程中, 应加强马铃薯多熟制轮作的研究, 从而探寻生态和经济综合效益更好的轮作方式, 为马铃薯产业发展提供技术支撑。

综上所述, 马铃薯轮作不仅可以帮助农民节约成本、提高经济效益, 同时还能收益间接的因农田土壤健康提升、生态环境改善而节约的生产

成本投入, 并且为国家环境治理节约成本。助力实现马铃薯产业健康发展的同时, 为中国农业的可持续发展贡献力量。

[参 考 文 献]

- [1] 关佳晨, 蔡海龙. 我国马铃薯生产格局变化特征及原因分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 92-100.
- [2] 原霁虹. 马铃薯连作障碍的研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2015, 29(1): 46-50.
- [3] Barbieri P, Pellerin S, Seufert V, *et al.* Changes in crop rotations would impact food production in an organically farmed world [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(5): 378-385.
- [4] Mosier A R, Halvorson A D, Petoson G A, *et al.* Measurement of net global warming potential in three agroecosystems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 972(1): 67-76.
- [5] Robertson G P, Grace P R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2004, 6(1): 51-63.
- [6] 句梦娜. 西兰花轮作对马铃薯黄萎病发生及土壤微生态的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [7] Wright P J, Falloon R E, Hedderley D. Different vegetable crop rotations affect soil microbial communities and soilborne diseases of potato and onion: literature review and a long-term field evaluation [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2015, 43(2): 85-110.
- [8] 李芬, 侯贤清, 李荣. 沟垄二元覆盖对旱作马铃薯耗水特征、产量及水分利用效率的影响 [J]. *核农学报*, 2019, 33(12): 2472-2481.
- [9] 刘战东, 肖俊夫, 于秀琴. 不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响 [J]. *中国农村水利水电*, 2010(8): 1-3, 7.
- [10] 何俊仕, 边晓东, 付玉娟, 等. 西辽河平原主要作物耗水量及耗水规律研究 [J]. *节水灌溉*, 2012(11): 1-4.
- [11] 刘帝, 操信春, 王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹 [J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(8): 719-724.
- [12] 郑成岩, 于振文, 马兴华, 等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配 [J]. *作物学报*, 2008(8): 1450-1458.
- [13] Westermann D H. Nutritional requirements of potatoes [J]. *American Journal of Potato Research*, 2006, 82(4): 301-307.
- [14] Alberta. Wheat nutrition and fertilizer requirements - nitrogen [DB/OL]. <https://www.alberta.ca/wheat-nutrition-and-fertilizer-requirements-nitrogen>.
- [15] Franzen D W. Soybean soil fertility [D]. Fargo, ND: North Dakota State University Extension Service, 1999.
- [16] Tindall T A, Westermann D T, Stark J C. Phosphorus nutrition in Idaho potatoes [J]. *Better Crops*, 1993, 77(1): 23-25.
- [17] Saskatchewan. Phosphorus Fertilization in Crop Production [DB/OL]. <https://www.saskatchewan.ca/business/agriculture-natural-resources-and-industry/agribusiness-farmers-and-ranchers/crops-and-irrigation/soils-fertility-and-nutrients/phosphorus-fertilization-in-crop-production>.
- [18] Staton M. Phosphorus and potassium fertilizer recommendations for high-yielding, profitable soybeans [D]. East Lansing, Michigan: Michigan State University Extension, 2014.
- [19] Alberta. Wheat nutrition and fertilizer requirements - potassium [DB/OL]. <https://www.alberta.ca/wheat-nutrition-and-fertilizer-requirements-potassium.aspx>.
- [20] Chen J, Bird G W, Mather R L. Impact of multi-year cropping regimes on *solanum tuberosum* tuber yields in the presence of *Pratylenchus penetrans* and *Verticillium dahlia* [J]. *Journal of nematology*, 1995, 27(4S): 654-660.
- [21] 高剑华, 田恒林, 沈艳芬, 等. 不同轮作方式对马铃薯产量和病害的影响 [C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与农村区域发展. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2013: 382-384.
- [22] 宋树慧. 不同前茬对马铃薯生育及土壤特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [23] 陈晓辉. 中国种植业结构演变及其资源环境代价研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [25] 谭雪莲, 郭天文, 刘高远. 马铃薯连作土壤微生物特性与土传病原菌的相互关系 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 30-35.
- [26] Zuber S M, Behnke G D, Nafziger E D, *et al.* Carbon and nitrogen content of soil organic matter and microbial biomass under long-term crop rotation and tillage in Illinois, USA [J]. *Crop Sciences*, 2018, 8(3): 37.
- [27] 徐雪风, 李朝周, 张俊莲. 轮作油菜对马铃薯生长发育及抗性生理指标的影响 [J]. *土壤*, 2017, 49(1): 83-89.
- [28] Dayegamiye A, Nyiraneza J, Grenier M, *et al.* The benefits of crop

rotation including cereals and green manures on potato yield and nitrogen nutrition and soil properties [J]. *Advances in Crop Science and Technology*, 2017, 5(3): 279-291.

[29] 万年鑫, 郑顺林, 周少猛, 等. 薯玉轮作对马铃薯根区土壤养分及酶活效应分析 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2016, 42(1): 74-80.

[30] 谭雪莲. 轮作模式下马铃薯土壤微生物多样性、酶活性及根系分泌物的研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.

[31] Weisz R, Smilowitz Z, Christ B. Distance, rotation, and border crops affect Colorado potato beetle (Coleoptera: *Chrysomelidae*) colonization and population density and early blight (*Alternaria solani*) severity in rotated potato fields [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1994, 87(3): 723-729.

[32] 孙淑葵, 谭广泰. 甜玉米-马铃薯轮作的关键技术及生产效益 [J]. *广东农业科学*, 2007(9): 10-12.

[33] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.

[34] 郭亚军, 易平涛. 线性无量纲化方法的性质分析 [J]. *统计研究*, 2008(2): 93-100.

[35] 石自忠, 王明利, 胡向东, 等. 我国牧草种植成本收益变化与比较 [J]. *草业科学*, 2017, 34(4): 902-911.

[36] 游永亮, 杨志敏, 李广有, 等. 河北坝上(张家口)地区饲用燕麦生产利用情况调研报告 [J]. *草业与畜牧*, 2015(5): 39-43.

[37] 宋佳承, 王天, 闫士朋, 等. 不同种植模式对土壤质量及马铃薯生长的影响 [J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 490-499.

[38] 胡新元, 孙小花, 柳永强, 等. 黄土高原半干旱区马铃薯连作对农田土壤生化性质及产量的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2019, 33(6): 344-351.

[39] 秦舒浩, 曹莉, 张俊莲, 等. 轮作豆科植物对马铃薯连作田土壤速效养分及理化性质的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40(8): 1452-1458.

[40] Smith P, Martino D, Cai Z, *et al.* Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789-813.

[41] 吴云霞, 蔡奎, 吕凤军, 等. 冀西北农牧交错带表层土壤营养元素特征研究—以河北省康保县为例 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(1): 84-89.

[42] 屈冉, 孟伟, 李俊生, 等. 土地利用和沉积物对富营养化的影响及控制对策 [J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 968-971.

[43] 李承力, 杨特武, 徐君驰, 等. 丹江口库区坡耕地不同轮作模式作物生产力及农田养分流失比较 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 83-87.

[44] 苏跃, 管智能. 浅议贵州多熟农作制度发展 [J]. *耕作与栽培*, 2005(3): 14-15, 61.

[45] 熊凡, 徐凤来, 兰承胤, 等. 坡耕地多熟轮作少耕技术 [J]. *农业科技通讯*, 1987(11): 27-28.

◆ 书 讯 ◆

现有《中国马铃薯》杂志 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 和 2019 年精装合订本, 中国马铃薯大会论文集 2011 年《马铃薯产业与科技扶贫》, 2012 年《马铃薯产业与水资源高效利用》, 2013 年《马铃薯产业与农村区域发展》, 2014 年《马铃薯产业与小康社会建设》, 2015 年《马铃薯产业与现代可持续农业》, 2016 年《马铃薯产业与中国式主食》, 2017 年《马铃薯产业与精准扶贫》, 2018 年《马铃薯产业与脱贫攻坚》, 2019 年《马铃薯产业与健康消费》和 2020 年《马铃薯产业与美丽乡村》, 每本定价 100 元。有需要的读者, 可与《中国马铃薯》编辑部联系。

联系电话: 0451-55190003