

# 玛河流域耕地景观细碎化与利用效率的关联性探析

李赛博, 徐丽萍, 方曼曼, 王睿, 琚小倩, 吕振涛, 万科幸

(石河子大学理学院, 新疆石河子 832003)

**摘要:**运用生态学景观格局指数测算了玛纳斯河流域耕地细碎化水平,利用DEA-Malmquist生产率指数方法测算了耕地利用的纯技术效率和规模效率,运用相关分析测度了细碎化水平与耕地利用的纯技术效率、规模效率和综合效率的关系。结果表明:研究区耕地逐渐由初期小面积斑块占主导、空间上破碎分布的格局趋于耕地景观连续化。20年间耕地景观综合效率为“降低—增加—降低”走势,同时耕地生产率呈现“增加—降低—增加”的趋势,耕地生产率和20年间的技术变化走势吻合。景观边缘复杂度和耕地景观规模度水平对耕地技术效率和全要素生产率产生一定负面影响。耕地景观形状的不规整阻碍了农业的发展及农业机械的采用,也造成农业经营效率的损失,无形中提高了使用机械的物质费用,降低了粮食生产的劳动生产率、土地生产率和成本产值率。

**关键词:**耕地景观; 细碎化; 利用效率; DEA; SPSS

**中图分类号:**F301.2; F323.21; S181

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)01-0311-06

## Analysis of Correlation Between Farmland Landscape Fragmentation and Utilization Efficiency in Manas River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

LI Saibo, XU Liping, FANG Manman, WANG Rui, JU Xiaoqian, LYU Zhentao, WAN Kexing

(College of Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** We calculated the level of farmland landscape fragmentation by ecology landscape pattern index in Manas River Basin, and used the method of DEA-Malmquist productivity index to measure the pure technical efficiency and scale efficiency of farmland use and relationship between the level of farmland landscape fragmentation and pure technical efficiency, scale efficiency, comprehensive efficiency of farmland use. The results showed that pattern of farmland of the study area had tended gradually to continuous farmland landscape from the early small dominated patches and fragmentized pattern in space. Farmland landscape comprehensive efficiency in the two decades had the trend of ‘reduce—increase—reduce’ and farmland productivity was the trend of ‘increase—reduces—increase’. Farmland productivity and technical change trend in the two decades were similar. Landscape edge levels of complexity and farmland landscape scale of arable land had negative effects on technical efficiency and total factor productivity. Farmland landscape irregular shape hindered the development of agriculture and agricultural machinery and caused the loss of agricultural management efficiency, which enhanced virtually the costs to use mechanical material and reduced the labor productivity and land productivity of grain production and cost output ratio.

**Keywords:** farmland landscape; fragmentation; utilization efficiency; DEA; SPSS

耕地细碎化是指由于自然或人文因素的干扰所导致的耕地景观由简单趋向于复杂的过程,即耕地景观由单一、均质和连续的整体趋向于复杂、异质和不连续的斑块镶嵌体<sup>[1]</sup>。耕地细碎化是许多国家农业中存在的主要问题之一<sup>[2-3]</sup>。主要原因是细碎化对农业生产效率具有一定影响<sup>[4]</sup>。其积极作用表现在耕

地细碎化有利于农户进行多元化种植;另一种观点则认为耕地细碎化阻碍了农业的发展及农业机械的采用<sup>[5-6]</sup>。Jabarin等<sup>[7]</sup>利用调查约旦北部的农户资料所获取的有关小麦生产方面的数据,运用广义最小二乘估计模型,研究耕地细碎化与小麦生产成本的关系,结果显示小麦生产成本因耕地细碎化的存在而增

收稿日期:2016-02-17

修回日期:2016-03-07

资助项目:石河子大学大学生研究训练计划项目(SRP2015301);国家级大学生创新创业训练计划项目(201510759079)

第一作者:李赛博(1994—),男,河南商丘人,本科生,研究方向为土地资源管理。E-mail:742187365@qq.com

通信作者:徐丽萍(1978—),女,新疆库尔勒人,副教授,主要从事资源与环境生态研究。E-mail:xlpalw@sina.com

加。Wadud 等<sup>[8]</sup>为研究耕地细碎化对农业生产技术效率的影响程度,以孟加拉为例,采用了随机前沿函数和研究方法,研究结果表明农户拥有的地块平均面积越大(即耕地细碎化程度越低),农户生产的农业技术效率就会越高。许庆等<sup>[9]</sup>以调查获得的吉林、四川、江西和山东 4 个省份在 1993 年、1995 年、1999 年和 2000 年的农户数据为基础,利用半对数模型,定量分析了家庭人均年收入与耕地细碎化之间的关系。王秀清等<sup>[10]</sup>以调查获得的山东省莱西市农户数据为基础,应用分组对比法、因子分析方法和聚类分析法,研究了耕地细碎化与农业生产之间的关系<sup>[10]</sup>。但一些学者研究层面只停留在了农民收入,即社会经济上,并没有从景观生态学的角度去分析两者之间的关系,而且很少有学者把景观生态学与数据包络分析结合起来去研究此问题,且针对玛河流域细碎化的时空特征及与耕地利用效率的关系分析尚未涉及。本文采用主成分分析法和数据包络分析法定量研究区域的耕地细碎化和耕地利用效率水平,以此为基础探析耕地细碎化和耕地利用效率的关联性,进而使耕地资源规模更具合理化,提高玛纳斯河流域灌溉农业现代化、科学化的合理性,为降低农业生产成本,提高耕地利用效率提供参考。

## 1 研究区概况

玛纳斯河流域 85°01′—86°32′E, 43°27′—45°21′N, 位于新疆准噶尔盆地西南部,相邻于准噶尔盆地边缘和著名的天山山脉,最高海拔 5 242.5 m,平原区海拔 300~500 m,地形南高北低,山区和平原各半。地处天山北坡经济开发区核心地带,流域总面积 8.432 万 km<sup>2</sup>,截止到 2010 年人口数达到 102.08 万人。该流域属于典型的大陆性气候,夏季炎热冬季寒冷,年均气温 6.8℃,年降水量为 110~200 mm<sup>[11]</sup>。

行政区域包括石河子市、沙湾县和玛纳斯县,以及分布在两县境内新疆生产建设兵团农八师和农六师的农牧团场。目前流域主要景观类型为:草地、未利用土地和耕地,占全流域的 90% 左右。流域水资源经过多年的开发,有利于耕地的扩张,现在玛纳斯河流域是中国第 4 大灌溉农业区。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据预处理

本研究遥感影像数据由美国地质勘察局(USGS)官方网站(<http://www.usgs.gov>)下载,包括 1990 年、2000 年、2005 年与 2010 年的 Landsat TM(分辨率 30 m×30 m)遥感影像数据。先对研究

区的同一时期的三景 Landsat 影像进行几何精校正、配准、图像镶嵌与裁剪、去云及阴影处理和光谱归一化预处理步骤。然后采用 eCognition 软件的面向对象的影像分析方法解译地物,同时从已经处理得到的研究区域的土地利用现状图上选取均匀的验证图斑,进行外业实地检验。根据《土地利用现状分类》国家标准,并结合研究区域的实际情况,划分出 9 类土地利用景观:草地、林地、水域、耕地、建设用地、裸地、沙地、盐碱地和未利用地。统计数据源主要来自研究期间的《新疆统计年鉴》、《新疆建设兵团统计年鉴》、《石河子统计年鉴》、《沙湾县统计年鉴》以及《玛纳斯县统计年鉴》。

### 2.2 景观指数选取

文章借鉴已有研究成果<sup>[12-13]</sup>,在耕地类型尺度上选择地块平均面积(MPS)、边界密度(ED)、地块密度(PD)、面积加权形状指数(AWMSI)和面积加权分维数(AWMPFD)等指数描述耕地细碎化。

### 2.3 主成分分析

由于所选衡量细碎化的景观指数之间存在着很大的相关性,因此本研究用主成分法消除相关性,避免主观赋权带来的偏差,并达到降维目的,使得能利用更少的变量更多地反映耕地细碎化的信息。同时,构建玛河流域地区耕地细碎化测度体系。

### 2.4 DEA 模型

Malmquist 生产率指数最初是由瑞典经济学家和统计学家 Malmquist 于 1953 年首先提出,用来分析不同时期的消费变化。Caves 等<sup>[14]</sup>首先将该指数应用于生产率变化的测算,此后与 Charnes 等<sup>[15]</sup>建立的 DEA 理论相结合,在生产率测算中的应用日益广泛。

根据 DEA-Malmquist 生产率指数方法,各效率存在以下关系:

$$TFPch = Effch \cdot Techch = Sech \cdot Pech \cdot Techch$$

式中:TFPch 代表 TFP 变化;Techch 代表技术进步;Effch 代表技术效率变化;Sech 表示规模效率变化;Pech 表示纯技术效率变化,当 Techch, Effch, Sech 或 Pech 大于 1 时,表明其对 TFP 的提高有促进作用,反之,则有阻碍作用<sup>[16]</sup>。

### 2.5 投入—产出指标选择

选取耕地产出指标时既要考虑耕地资源的经济效益,又要考虑耕地的社会效益。经济效益指标主要选取农业(种植业)总产值,其作为一项基本的输出指标可以反映某个区域的农业生产活动的规模和总量;耕地的社会效益主要表现为保障国家的粮食安全和社会稳定,因此,利用粮食总产量作为耕地社会效益的衡量指标。

农业生产的投入指标可以用土地、资本和劳动力投入的数量来表征<sup>[17-19]</sup>。鉴于数据的可获得性,用农作物播种面积来表示土地的投入,资本的投入用农田化肥施用量和农业机械总动力来表示,劳动力投入用生产中的实际劳动人员来表示。

### 3 结果与分析

#### 3.1 玛河流域耕地细碎化评价

1990—2010 年,玛河流域耕地景观由研究初期小面积斑块占主导的格局和空间上破碎分布的格局逐渐

趋于耕地景观连续化(图 1)。耕地的平均斑块面积逐年递增,递增幅度高达 29.11%,且尤以 2005—2010 年、1990—2000 年两时段内递增幅度最为显著,分别高达 99.33%,77.32%。与此相反,耕地景观的斑块密度、面积加权的平均形状指标和面积加权的平均斑块分维数总体呈现出递减趋势,尤其在 2005—2010 年,这一变化更为明显。其中,斑块密度指数减少了 35.85%,面积加权的平均形状指标和面积加权的平均斑块分维数则分别由 2005 年的 17.395 5、1.246 3 减少到 2010 年的 14.769 8、1.232 4。

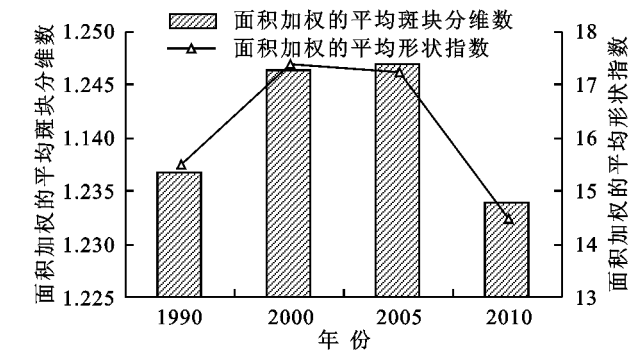


图 1 玛河流域耕地景观指数变化

1990—2010 年,玛河流域耕地景观主要向西部扩展,同时又向内部蔓延(图 2)。其中耕地面积增加量近似于 1990 年的耕地面积的 97.75%,但是也存在 3.7%

耕地面积减少的现象。耕地减少区域主要分布在石河子行政区域内,这和 1990—2010 年石河子市区急速扩张有关,且耕地消亡形状和市区蔓延形状吻合。

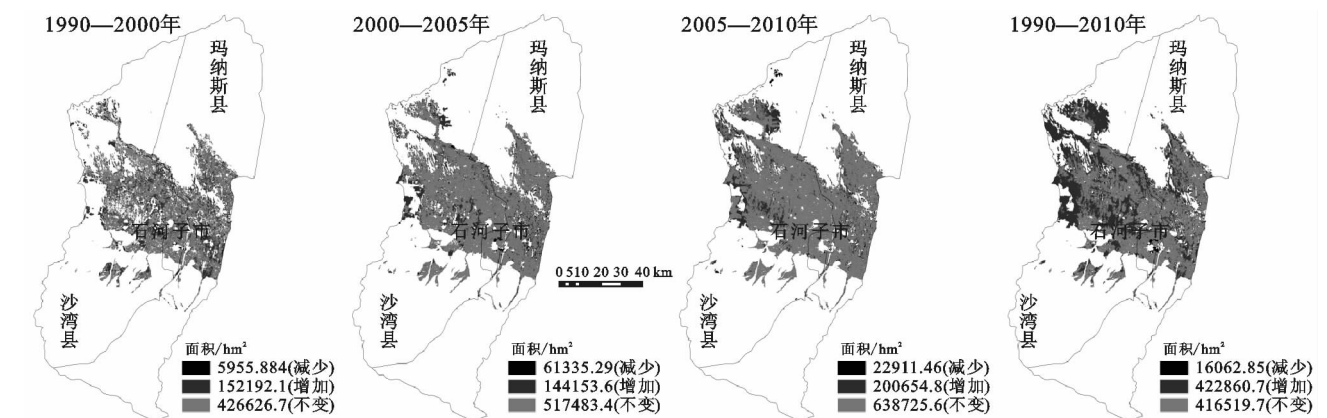


图 2 玛河流域 1990—2010 年耕地动态分布

对于 1990—2000 年,可以看出 1990 年的耕地细碎化现象比较严重,在这 10 年间扩张的耕地主要沿着原有的耕地景观边界向其周围蔓延。2000—2005 年耕地面积增加值和 1990—2000 年相近,不过从空间上可以看出,蔓延区域主要分布在沙湾县,玛纳斯县增加的耕地比较分散。2005—2010 年耕地面积增加 200 654.8 hm<sup>2</sup>,比前两个阶段增加明显,且沙湾县是主要的扩展区域。

文章用主成分法消除景观指数的相关性,计算景观指数特征值及对细碎化的贡献率,前两个主成分的累计贡献率达到了 98.76%,大于 85%,说明前两个主成分的变化基本可代表 5 个景观指数的变化,可用

第一和第二主成分综合衡量耕地细碎化度。

第一主成分与边缘密度(ED)、面积加权的平均形状指标(AWMSI)、面积加权的平均斑块分维数(AWMPFD)的相关系数在 0.80 以上,其中与 ED, AWMSI, AWMPFD 的相关系数是正值,表示边缘密度越大,形状越复杂,第一主成分数值越大。第二主成分主要代表平均斑块面积和斑块密度(PD),载荷值大于 93%。其中与平均斑块面积的相关系数是 -0.935,表示第二主成分与平均斑块面积是负相关关系,斑块平均面积越大,第二主成分数值越小。PD 与第二主成分的相关系数是 0.993,表示斑块密度越大,耕地景观越趋于细碎化,第二主成分值越大。

### 3.2 玛河流域耕地利用效率评价

研究区域包含的县级行政区域即 DMU(决策单元)较少,DEA 模型的  $C^2R$  模型分析,需要 DMU 个数多于投入和产出个数及主要用于截面数据。如果强行进行  $C^2R$  模型分析会导致最终的效率值真实性降低。针对此现象,采用 DEA 模型的 Malmquist 指数分析处理面板数据和时间序列数据,计算出 3 个研究期间段的效率变化量。将时刻上的景观细碎化指数,转为 3 个研究期间的变化量,以建立变化量和变化量之间的关系。

使用学者 Coelli<sup>[19]</sup> 编写的 DEA 模型专用程序 DEAP Version 2.1,采用产出导向的方法,对玛河流

域 1990—2010 年的耕地利用效率变化值进行测算,其中综合效率=技术效率×规模效率。

玛河流域近 20 年耕地景观综合效率为“降低—增加—降低”走势(图 3)。前 10 年,研究区域的耕地面积虽然在急剧增加,但是处于规模递减阶段,即对耕地利用效率不高,对耕地的粗放现象比较严重。其中比较异常的是这 10 年纯技术效率变化稳定在 1,即给定投入的情况下耕地获取最大产出的能力不变。而 2000—2005 年的综合效率变化值为 1.420,大于 1,5 年增加 42%。同时耕地生产率呈现“增加—降低—增加”的趋势,和 20 年间的技术变化走势吻合。

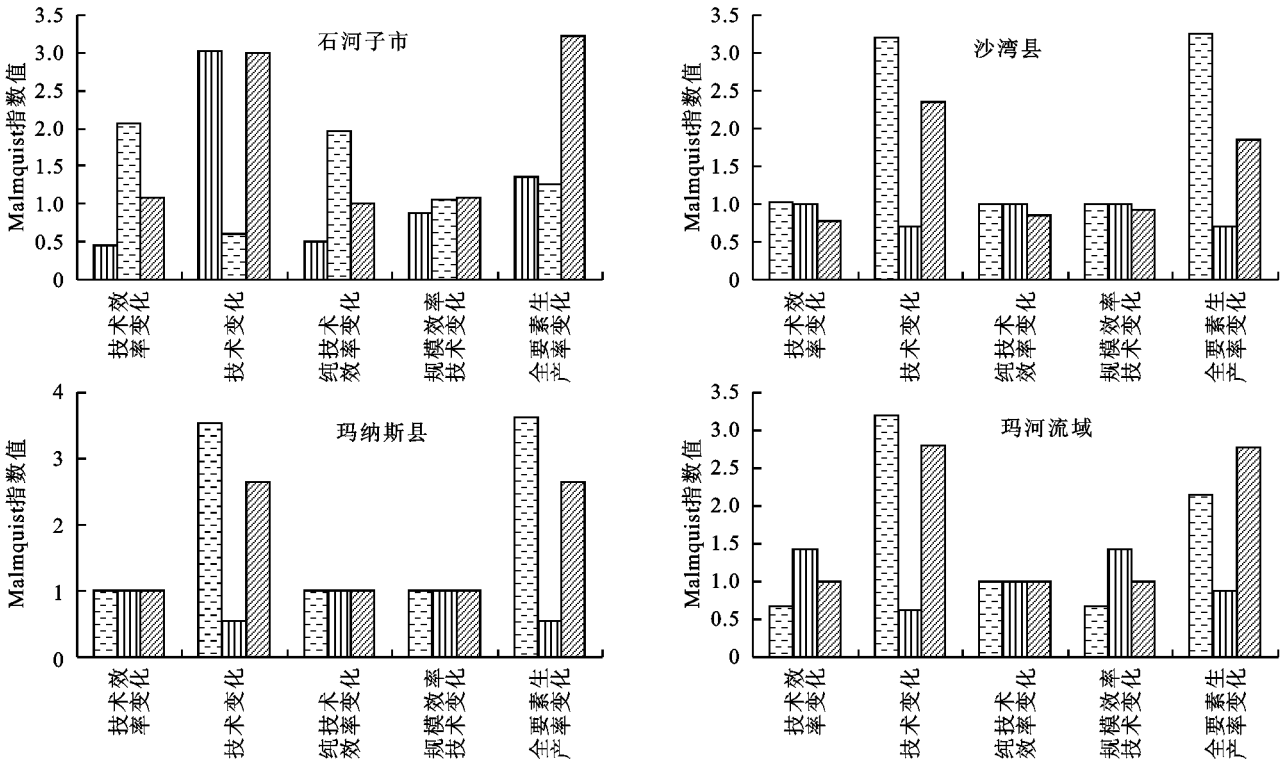


图 3 玛河流域分地区耕地利用效率评价

石河子市 1990—2000 年耕地景观处于规模效率递减阶段,而 2000—2010 年纯技术效率和规模效率都有所提升,其中纯技术效率提升更为明显。玛纳斯县和沙湾县在 1990—2000 年的综合效率变化大于 1,玛纳斯县的纯技术效率并没有提升,而是规模更优,对于沙湾县这两者均有升高,2000—2005 年两县的综合效率值为 1,处于稳定阶段,而技术变化在降低。2005—2010 年玛纳斯县的技术得到明显提升,而沙湾县处于规模递减阶段,且纯技术效率值也有所降低。对于耕地生产率,石河子市在 20 年间一直增加,其中在 1990—2010 年和 2005—2010 年,技术变化对其贡献最大,2000—2005 年纯技术效率变化和规模效率变化对其贡献较大。玛纳斯县和沙湾县在 1990—2000 年和 2005—2010 年的耕地生产率处于增长阶段,且主要贡献都在于技术提升,即耕地生产

率的增长主要依靠技术进步水平的提高,而不是耕地效率水平(技术效率和规模效率)的改善。

石河子市耕地利用综合效率变化值为 1,即给定投入的情况下耕地获取最大产出的能力不变,而技术变化达到了 1.763(图 4)。沙湾县的耕地综合效率变化值为 0.927,耕地利用效率在下降,其对耕地生产率的贡献率为-7.3%,纯技术效率和规模效率对综合效率的贡献分别为-5.5%和-2%。玛纳斯县 20 年间,耕地利用效率处于增长阶段,规模效率贡献率为 0.7%,同时综合利用效率对耕地生产率的贡献率为 0.7%,而技术变化对其贡献率达到了 71.2%。

### 3.3 玛河流域耕地细碎化与利用效率关系分析

文中分别选取耕地技术指数值和耕地全要素生产率值作为因变量,以反映耕地细碎化的第一、第二主成分为自变量,建立逐步回归模型。分析结果表

明,第一、二主成分均未进入模型,说明这两个指标与耕地技术指数、全要素生产率指数之间未呈现明显的相关关系。针对此现象,本文拟采用相关分析中的“线性双变量”分析,耕地技术指数和耕地全要素生产率指数均与第一、二主成分呈现负相关。其中第一主成分包括边缘密度(ED)、面积加权的平均形状指标(AWMSI)、面积加权的平均斑块分维数(AWMPFD),说明随着第一主成分值的增加即耕地景观边缘越复杂其耕地技术指数和全要素生产率指数是递减的。第二主成分主要代表平均斑块面积和斑块密度(PD),且与平均斑块面积是负相关和斑块密度呈现正相关关系,其中  $F_2$  值越大,即耕地景观规模度越低,耕地景观破碎度越高,而耕地技术值和全要素生产率指数越低。

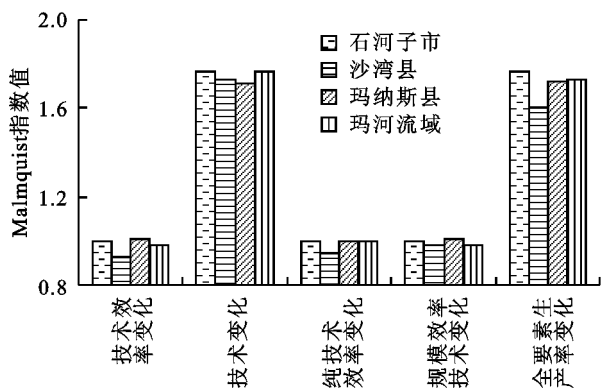


图 4 1990—2010 年玛河流域分地区耕地利用效率评价

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

对耕地细碎化与耕地利用效率的关系进行研究时,实际有两种截然不同的观点,一种观点认为:耕地细碎化有利于农户进行多元化种植,合理配置并充分利用农村劳动力,以维持或增加农户的种植业净收入;另一种观点则认为耕地细碎化阻碍了农业的发展及农业机械的采用,也造成农业经营效率的损失和耕地面积的减少,无形中提高了使用机械的物质费用,降低了粮食生产的劳动生产率、土地生产率和成本产值率<sup>[20-22]</sup>。本研究结果表明,当地的耕地技术确实有所提高,而反映在耕地利用效率上并没有很好体现出来,出现这种情况的原因可能是某些地区落后的耕作水平拉低了整个行政区的耕地技术水平,即差异显著。且石河子 1990 年的播种面积为 152 400  $\text{hm}^2$ , 2010 年的播种面积为 194 580  $\text{hm}^2$ ,增加了 42 180  $\text{hm}^2$ ,1990 年的农业总产值为 47 192 万元,2010 年的农业总产值 904 983 万元,表明 20 年间石河子地区的农业产值增长可能大多建立在播种面积的增加,而在单位面积上的产出即耕地利用效率并不是很乐观。

其中对于边缘复杂度较高问题,一方面要使农民权益得到保障,同时要参照节约集约利用耕地的规定,对耕地进行重新划定,通常采取措施对形状不规则、达不到机械耕作要求的耕地,可以利用相关的手段将其转化为整齐、规则,以进行集约经营,促进农业经济的不断发展,为创建社会主义现代化农村,积极构建新型农村提供前提条件。本文的耕地细碎化指标由景观边缘复杂度和耕地景观规模度水平两个因素组成,且目前对玛河流域耕地技术效率和全要素生产率产生一定负面影响,但是这种影响往往随着细碎化水平而改变,因此下一步需要结合此现象确定研究区的最佳耕地规模。

### 4.2 结论

(1)近 20 年,研究区耕地景观逐渐趋于连续化。不同阶段内耕地景观连续化进程表现出不同的演变趋势,但景观连续化依旧是研究区耕地景观格局变动的主旋律。随着时代进步,玛河流域以及其区域内的石河子市、玛纳斯县和沙湾县,其耕地生产率和时代进步息息相关,而时代进步则通过技术进步体现,纯技术效率和规模效率并没有起到明显的促进作用。

(2)1990—2010 年玛河流域耕地景观形状的不规整阻碍了农业的发展及农业机械的采用,也造成农业经营效率的损失,无形中提高了使用机械的物质费用,降低了粮食生产的劳动生产率、土地生产率和成本产值率。同时耕地景观规模化的降低,一定水平上抑制了玛河流域的耕地技术效率和全要素生产率。对于机耕,要求条田具有一定的长度,若条田太短,农机开行长度太小,转弯次数增多,生产率较低,机械磨损较大,消耗燃料也多,根据试验测定,拖拉机开行长度小于 300~400 m 时,生产效率显著降低<sup>[23]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 李鑫,欧名豪,马贤磊.基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影响研究:以扬州市里下河区域为例[J].自然资源学报,2011,26(10):1758-1767.
- [2] 吕晓,黄贤金,钟太洋,等.中国农地细碎化问题研究进展[J].自然资源学报,2011,26(3):530-540.
- [3] 刘七军,曲玮,李昭楠.耕地细碎化对干旱绿洲区作物生产和农户收入影响效应调查分析:以甘肃省民乐县为例[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):191-198.
- [4] 田孟,贺雪峰.中国的农地细碎化及其治理之道[J].江西财经大学学报,2015(2):88-96.
- [5] 李庆东,王秋兵,钱凤魁,等.农户耕地经营细碎化分析:以辽宁省昌图县为例[J].广东农业科学,2010,37(6):230-232.
- [6] 牛新胜,王绍雷,吕振宇,等.华北平原典型农区农地细碎化对村级农田林网的影响:以河北省曲周县为例[J].

- 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 447-455.
- [7] Jabarin A S, Epplin F M. Impacts of land fragmentation on the cost of producing wheat in the rain-fed region of northern Jordan[J]. *Agricultural Economics*, 1994, 11(2/3): 191-196.
- [8] Wadud A, White B. Farm household efficiency in Bangladesh: a comparison of stochastic frontier and DEA methods[J]. *Applied Economics*, 2000, 32(13): 1665-1673.
- [9] 许庆, 田士超, 邵挺, 等. 土地细碎化与农民收入: 来自中国的实证研究[J]. *农业技术经济*, 2007(6): 67-72.
- [10] 王秀清, 苏旭霞. 农用地细碎化对农业生产的影响: 以山东省莱西市为例[J]. *农业技术经济*, 2002(2): 2-7.
- [11] 南峰, 李有利, 史兴民, 等. 新疆玛纳斯河流量波动与气候变化之间的关系[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(3): 59-61.
- [12] 黄思琴, 陈英, 张仁陟, 等. 基于景观指数的耕地细碎化与农业经济水平的空间相关性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2015(3): 238-244.
- [13] 孙美琴, 赵成义, 施枫芝, 等. 近 20 a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 16-21.
- [14] Caves D W, Diewert W E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity[J]. *Econometrica*, 1982, 50(6): 1393-1414.
- [15] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [16] 邓宗兵. 中国农业全要素生产率增长及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [17] 张宁, 陆文聪. 中国农村劳动力素质对农业效率影响的实证分析[J]. *农业技术经济*, 2006(2): 74-80.
- [18] 赵芝俊, 张社梅. 近 20 年中国农业技术进步贡献率的变动趋势[J]. *中国农村经济*, 2006(3): 4-12.
- [19] Coelli T. A guide to DEAP version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program[Z]. Australia: University of New England, 1996.
- [20] 张荣天, 焦华富. 中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 277-287.
- [21] 李庆东, 王秋兵, 钱凤魁, 等. 农户耕地经营细碎化分析: 以辽宁省昌图县为例[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 230-232.
- [22] 李功奎, 钟甫宁. 农地细碎化、劳动力利用与农民收入: 基于江苏省欠发达地区的实证研究[J]. *中国农村经济*, 2006(4): 42-48.
- [23] 马永宏. 小型灌区农田水利渠道设计与施工分析[J]. *科技创新与应用*, 2016(1): 149-150.

~~~~~

(上接第 310 页)

- [13] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [14] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2237-2244.
- [15] Heather Tallis, Taylor Ricketts, Anne Guerry, et al. InVEST 2.2.0 User's Guide[Z]. Stanford: The Natural Capital Project, 2011.
- [16] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [17] 吴季秋. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的海南八门湾海湾生态综合评价[D]. 海口: 海南大学, 2012.
- [18] 刘志伟. 基于 InVEST 的湿地景观格局变化生态响应分析: 以杭州湾南岸地区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] 唐蜜. 县域生态系统非木材林产品产品服务功能评估研究: 以四川省宝兴县为例[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2010.
- [20] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [21] 傅伯杰, 陈利项, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [22] 申彦舟. 县域景观生态安全格局研究[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [23] Yu K. Ecological security patterns in landscapes and GIS application[J]. *Geographic Information Sciences*, 1995, 1(2): 88-102.