

综合研究

耕地复种差研究进展*

余强毅, 项铭涛, 谢安坤, 申 格, 杨 鹏, 吴文斌[※]

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部农业遥感重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】一个区域的粮食总产受作物单产、耕地面积与复种3方面因素影响, 通过缩小实际复种与潜力复种之间的差值(即复种差)来提高粮食生产能力是可行的。【方法】文章从复种的理论基础出发, 以“复种差概念—实际复种研究—潜力复种研究—复种差研究”为主线, 系统梳理当前复种差研究的进展与问题。【结果】研究发现, 当前研究大多利用复种指数描述复种情况, 且认为“复种差=潜力复种指数-实际复种指数”。复种指数体现的是区域的平均情况而非地块的特定情况, 因此, 基于复种指数估算复种差, 无法针对特定地块提出具体的复种差利用策略。实际上, 地块尺度复种差与(区域)生育期长度(LGP)、(作物)成熟天数(DTM)以及种植方式等因素有关。文章进而从LGP利用的视角提出了一个地块复种差研究的可行模式, 认为“复种差=(LGP-现实作物DTM)/潜在作物DTM”。【结论】地块尺度复种差研究能为优化资源利用方式, 提高耕地集约化利用程度, 提升粮食生产能力提供新的理论与方法支撑。

关键词: 复种; 复种指数; 种植频率; 土地利用; 土地潜力; 土地集约化

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180501

0 引言

中国农业在过去几十年取得了举世瞩目的成就, 利用全球8%的耕地供养了全球20%的人口^[1-2]。“十三五”以来, 我国继续推进“谷物基本自给、口粮绝对安全”的国家粮食安全战略, 确保中国人的饭碗始终牢牢端在了自己手上。2017年“中央一号”文件明确, 推进农业供给侧结构性改革的进程中要确保粮食生产能力不降低, 同时还进一步提出, 深入实施藏粮于地、藏粮于技战略, 严守耕地红线, 保护优化粮食产能。然而, 面对当前我国人口持续增长、资源环境限制不断加大等问题, 如何确保粮食生产能力建设不断夯实, 成为我国推进粮食安全战略的新挑战^[1]。

粮食总产等于作物单产与收获面积的乘积, 而收获面积主要取决于耕地面积的多少与复种的次数。进而, 影响粮食总产的因素可以分解成作物单产、耕地面积、复种3个方面。

收稿日期: 2018-08-15

第一作者简介: 余强毅(1986—), 男, 湖南岳阳人, 副研究员, 研究方向: 农业土地系统。Email: yuqiangyi@caas.cn

※ 通信作者简介: 吴文斌(1976—), 男, 湖北潜江人, 研究员, 研究方向: 智慧农业。Email: wuwenbin@caas.cn

* 基金项目: 国家重点研发计划项目全球粮食供需变化下的中国耕地可持续化研究(2017YFE0104600)课题: 全局尺度耕地利用可持续性提升模式研究; 国家自然科学基金项目中国耕地复种潜力提升空间及优化配置(41871356)

作物单产方面，近年来作物单产增加对我国粮食总产的贡献显著，但研究表明，我国的作物单产已经接近“天花板”^[3]，提升空间已经非常有限^[4]。耕地面积方面，在快速城市化背景下，我国耕地面积总体呈下降趋势，对粮食总产产生负面影响^[5]。因此，在严守耕地数量和质量红线、努力提高作物单产的同时，还应该注重提高耕地资源集约利用程度。

复种 (multi-cropping) 是反应耕地资源集约利用程度的重要指标^[6]，具体指一块地上一年内种收一季以上作物的种植方式^[7]；“复种潜力” (multi-cropping potential) 是指在考虑地块所处的自然环境特征的基础上，理论上一年内的最大种收次数^[8-9]。围绕复种与复种潜力，相关案例研究已经广泛在全球尺度^[10-11]以及区域尺度开展，包括中国^[12]，亚洲^[13]，欧洲^[14-15]，北美^[16]，南美^[17-18]等。在已有耕地基础上增加复种以缩小复种与复种潜力之间的差值（即复种差），成为能否继续提高耕地资源集约利用程度的关键^[19-21]。

当前研究大多利用复种指数描述复种情况。“复种指数” (multi-cropping index) 是指区域收获面积与耕地面积的比值（值可以为小数），反映的是区域的平均情况而非地块的特定情况。此外，“种植频率” (cropping frequency) 也用以描述复种情况，指的是具体的种收次数（值只能为整数），其不仅反映了地块的特定情况，也体现了复种的原始内涵。已有研究容易忽视概念、数据、方法方面的差别，导致不同研究之间缺乏可比性。该文将以“复种差概念—实际复种研究—潜力复种研究—复种差研究”为主线，系统梳理当前复种差研究的相关国内外研究进展。进而，总结了基于复种指数在区域尺度研究复种差的不足，并提出了一个基于种植频率在地块复种差研究的可行模式，为未来复种差研究提供理论与方法参考。

1 复种差概念的提出

作物需要在特定的水热条件下，经过一定时间生长才能达到成熟，农学上称之为成熟天数 (days to maturity, DTM)。这一过程需要从两方面理解：一方面，DTM 很大程度上与作物类型、品种、种植期等因素有关^[22-23]，体现作物本身特征与栽培管理水平；另一方面，作物种植也需要考虑环境因素，例如适宜的温度与降水。因此，农业气象、农业地理等学科从资源利用的角度提出了生育期长度的概念 (length of growing period, LGP)，即特定区域内降水与温度共同使作物得以生长的持续时间，用“天”来表示^[24]。

理论上而言，如果一个区域的 LGP 能够先后包含多个完整 DTM，那么该区域一年内就能种收多季作物（地块复种潜力的数学表达见表 1）。我国主要作物的 DTM 在 60~250d 之间（包括冬季作物越冬期），平均标准 DTM 为 90d 左右^[25]。标准情况下，根据温度、降水等自然条件，我国南方的某些区域一年内理论上最多能支持种收 3 次（即 $LGP \geq 3 * DTM$ ，图 1a），大部分地块支持种收 2 次（即 $3 * DTM \geq LGP \geq 2 * DTM$ ，图 1b），北方冷凉地区的地块一般只能种收 1 次（即 $2 * DTM \geq LGP \geq DTM$ ，图 1c）。由于区域尺度的 LGP 一般是特定的，而 DTM 是根据作物类型、品种以及种植方式等变化而变化的，理论上可通过合理配置作物类型与种植方式，提高地块种收的次数，反之亦

2018年10月

然。例如，如果选择种植DTM较长(≥90d)的作物，可能会因为其占用的LGP过长，而使得剩余的LGP不够支持种收一季DTM同样较长的作物，从而降低地块的潜在种收次数。此外，间作、套作、连作等种植方式可以使前后两季作物共生一段时，最高可达80d左右^[25-26]。这些方式可以有效提高对LGP的利用，例如，采用间作套作方式种植两季DTM=90d的作物，两季共同利用的LGP将小于180d，而使得LGP相对不足的情况下，仍然能够支持复种(图1d)。

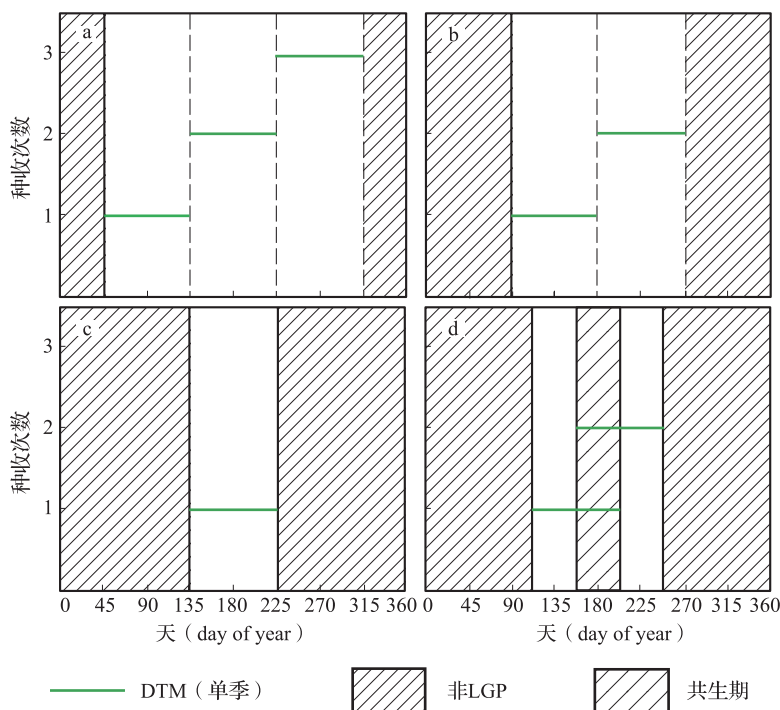


图1 复种潜力的农学与地理学意义

Fig.1 Concept of multi-cropping

复种差研究是复种研究在实际维度与潜力维度的整合与深化。与复种相关的学术概念很多，包括种植频率^[17]、收获频率^[10]、种植指数^[7]、(统计)复种指数、(遥感)复种指数、潜力复种指数^[27-28]等。首先值得说明的是，种植频率与收获频率(类比于种植面积与收获面积)，二者虽有差别，但该研究不重点关注年初与年末种收之间的差异，因此，二者等同对待。表1简单梳理了复种差研究的主要概念，并将相近或相似的概念进行了合并处理。虽然作物DTM与区域LGP是复种差研究的理论基础，但当前研究很少考虑作物生长期特征，而是直接考虑复种情况，且大多在区域尺度或者像元尺度开展(表1)。

表1 复种差研究的主要概念

Table 1 Concepts for multi-cropping studies

		地块尺度	像元尺度	区域尺度
作物生长期特征 (理论层面)	实际	基于现实作物DTM	基于遥感观测的耕地物期 ^[29]	不适用
	潜力	基于潜在作物DTM	基于区域LGP	= 区域LGP ^[24]

续表

	地块尺度	像元尺度	区域尺度
实际	= 种植频率 ^[30]	基于遥感观测的耕地种植频率 ^[31]	基于统计数据的复种指数 ^[32]
复种特征 (应用层面)	潜力 =LGP/DTM (取整)	= 潜力复种指数 ^[12]	= 潜力复种指数 ^[28]
复种差	= (LGP- 实际 DTM) / 潜在 DTM (取整)	= 潜力复种指数 - 种植频率 ^[20]	= 潜力复种指数 - 复种指数 ^[19]

注：“=”指概念等同；“基于”指概念类比

由于数据获取方面的优势，基于统计数据的复种指数研究率先在区域尺度开展^[32]（表 1）。但复种指数与复种的原始定义（即种收次数）稍有差别：首先，复种指数作为区域内种植面积与耕地面积的比值，是二者的因变量，而对于特定地块，种收次数是种植面积的自变量，二者在内涵上已经有本质差别；其次，由于种植面积与耕地面积等统计指标相对独立，且统计数据一般统计各类作物的种植面积，并不直接统计“作物种植面积”这一综合指标，因此在计算统计复种指数的时候，一般需要先先将各类作物的种植面积进行汇总，然而这一过程标准较难统一，由此统计复种指数计算结果可能出现违背常理的情况（如远大于三）。

随着遥感技术的发展，利用遥感植被指数，可以在空间像元尺度观测作物生长状况（表 1）。通过平滑作物生长曲线，提取波峰频数，进而可了解像元的复种情况^[31-33]。遥感提取种的植频率已经十分接近复种的原始定义，但遥感影像（尤其是中低分辨率遥感影像）容易产生混合像元问题，导致网格提取的波峰频数一般为多个地块多种作物的平均值，这导致与地块种收次数这一原始内涵又稍存差别。

区域尺度、像元尺度的研究大多不考虑不同作物 DTM 的差异情况，因此，复种潜力一般由区域 LGP 与标准作物 DTM 之间的比值决定。例如，杨晓光等人将中国南方统称为“潜在一年三熟区”^[34]。在此基础上，当前的复种差研究也大多基于区域平均情况开展^[19-21]，而地块尺度复种差研究暂未见报道（表 1，图 2）。由于区域内部各个地块的作物类型、品种、种植方式等各不相同，如何理解区域尺度复种差的现实意义成为巨大挑战。例如图 2 所示，假设一个种植指数为 1.89 且标准复种潜力为 3 的地区，从复种指数的角度还有 1.11 的复种提升空间，但在哪提高、如何提高等问题需要转换到地块尺度视角才能有效解决。综上所述，复种潜力是一个综合的概念，与区域 LGP、作物 DTM 以及种植方式等因素有关，但传统区域尺度、基于复种指数的复种差研究无法考虑上述因素的协同影响。下面将分别从实际复种、潜力复种两方面详细梳理当前研究的进展，进而论述为何当前的实际复种与潜力复种研究无法科学支持复种差研究。

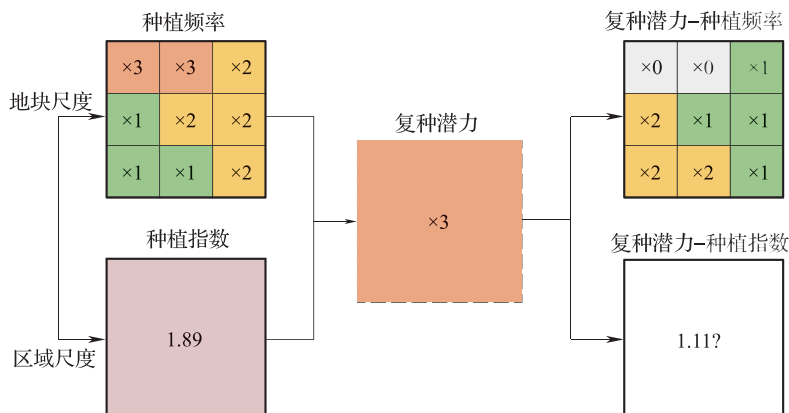


图2 复种差研究的概念模型
Fig.2 Conceptual model for multi-cropping studies

2 实际复种研究

实际复种研究是指对真实复种情况的观测。由于统计数据较容易获取，统计复种指数研究率先开展。刘巽浩测算发现全国的种植指数由1952年的131%上升到1995年的158%，增加了27%，大致等于增加农作物播种面积0.27亿 hm^2 ；此外，我国以复间套种为中心的多熟制土地上所生产的粮食约占全国的75%，在我国农业生产中具有举足轻重的地位，在世界上也是走在前面^[7]。随后，一些学者利用统计数据获取的播种面积与耕地面积两个指标，将复种指数（时间）变化特征研究^[35]，扩展到时空差异研究^[10, 32]，并探讨引起这种时空差异的原因^[36]。这类研究结果直接汇总在行政单元，有利于对比不同行政区之间的耕地集约化利用程度；此外，由于数据获取较易，有利于分析较长时段内复种指数的变化特征。但受限于数据特性，行政区内部的空间差异特征无法体现，即统计复种指数仅体现多个地块平均的复种情况，而每个地块的复种信息无法获取。

随着遥感技术的发展，遥感复种指数研究逐步兴起。一些学者利用NOAA/AVHRR-NDVI^[37]，SPOT/VGT-NDVI^[33, 38-39]，MODIS-NDVI^[14, 40]，MODIS-EVI^[41]以及多源遥感数据长时序NDVI^[42-43]或EVI^[44]，对作物生长过程进行观测。并采取Savitzky-Golay滤波^[45]，HANTS^[33, 37]，非线性拟合^[29, 46]，小波变换方^[39]等方法对植被指数进行平滑后提取波峰个数（或者直接采用决策树法提取波峰个数^[41]），进而判断像元的复种情况。这类研究一般采用中低分辨率遥感影像（如分辨率1 km），考虑到中国耕地破碎化程度较高，网格提取的波峰频数一般为多个地块多种作物的平均值，并不能代表每个地块种植频率的具体值。此外，当前遥感复种指数研究一般都会以网格耕地面积为权重，将结果汇总到统计单元并与统计复种指数对比，以此校正波峰频数提取结果，大大降低了复种指数信息的独立性。

由于数据获取限制，地块尺度的实际种植频率较难获取，相关研究鲜见报道，这也成为未来研究需要着眼解决的关键科学问题之一。有研究开始尝试用Landsat与MODIS数据相融合的方法，在30 m空间分辨率尺度获取遥感复种指数^[47]；另有研究将多年

地块尺度 Cropland Data Layers (美国官方作物分布数据) 叠加估算种植频率^[48]；中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研发的 eFarm 系统，通过众包 (human sensing & crowdsourcing) 的手段，能直接获取每个空间地块的复种信息^[30]，这些新研究为提取地块尺度复种情况提供了有益参考。

3 复种潜力研究

复种潜力研究是指对潜在复种能力的预测。杨晓光等人利用大于等于 0℃有效积温，选择 5 900℃与 4 200℃为阈值，划分中国一年三熟、两熟种植北界^[34]；同样利用温度阈值法，Ray 等人在全球 10 km 空间尺度估算了网格的最大复种潜力^[10]。范锦龙与吴炳方利用县级尺度统计复种指数与温度、降水的相关关系，建立复种潜力经验估算模型^[28]；刘洛等人利用农业生态区模型，综合考虑温度、降水、蒸散、土壤、地形等因素，在 10 km 空间分辨率尺度，估算中国复种潜力格局^[49]。左丽君等人基于 250 m 空间分辨率尺度全国遥感复种指数提取结果，利用随机前沿法，估算气象、地形、社会经济等因素综合影响下的复种潜力最大值^[12]。

已有研究多关注气候等自然因素对区域尺度标准复种潜力的影响，而地块尺度、考虑特定作物种植情况的复种潜力研究较少。具体而言，已有研究一般估算的是潜力复种指数，且潜力复种指数估算本身的方法与理论也存在一些问题。例如，根据范锦龙与吴炳方的经验方法^[28]，年平均温度与年平均降水量是决定区域潜力复种指数的仅有两个变量，这种简单化处理无法考虑年内温度降水波动、雨热不同季、极端天气事件等问题，加大了估算结果的不确定性。此外，标准复种指数估算大多预先限定了潜力复种的上限，如中国最高为一年三熟^[28, 34]，但这可能与实际不符。一方面，在气温非常适宜的地区配合以灌溉、间作套作、作物品种优选等田间管理手段，完全可能实现种植次数超过 3 次；另一方面，根据统计数据，一些县的统计复种指数的确存在高于 3 的情况。这意味着由这套方法估算的复种潜力指数，可能并不是真实的潜力上限。简单忽略这些情况，具有明显的人为倾向性，最终会导致整个估算结果的偏差加大。

潜力复种指数的内涵是泛化的，估算结果是固定的，不能很好地反应现实情况；而地块尺度复种潜力的内涵是具体的，估算结果是浮动的（与区域 LGP、作物 DMT 以及种植方式等因素有关）。因此二者不能简单等同。相对于区域标准复种潜力，地块复种潜力对科学制定集约化方案有更为直接的参考意义。不同作物类型、种植方式的组合将对地块标准复种潜力产生何种影响是未来研究需要着眼解决的另一关键科学问题。

4 复种差研究

复种差研究是评估实际复种情况下继续开发复种潜力的可能性。何文斯等人利用“温度—降水”复种潜力经验估算模型测算县级尺度潜力复种指数，然后将其与县级尺度统计统计复种指数相减，估算复种差^[27]。利用同样的思路，左丽君等人将其在 250 m 空

2018年10月

间尺度估算得到的标准复种潜力与遥感提取的复种指数相减估算复种差^[12]。在全球尺度，吴文斌等人与Ray等人分别提出了cropping intensity gap^[20]与harvest gap的概念^[10]，在网格尺度与国家尺度估算了复种差。

测算复种差的最终目的在于通过提高复种，实现粮食增产。在杨晓光等人估算的一年多熟种植北界基础上^[9]，结合网格尺度真实耕地面积数据与作物种植面积数据^[50]，余强毅等人将这3者相结合，量化了不同水资源分配情景下的收获面积潜力。据其测算，中国在2005年左右的收获面积潜力在1 333.33万hm²左右^[21]，受气候变化与耕地实际利用程度的共同影响，1981—2010年间，中国的收获面积潜力经历了先减少再增加的过程^[19]，当前的收获面积潜力在现有粮食生产力水平下约相当于1.17亿t产量潜力^[51]。

耕地过度集约化利用，会带来极大的环境影响，从而影响可持续发展。实施保护性农业（conservation agriculture）是缓解环境压力的一个有效手段^[52]。同时，发展可持续农业，推进生态文明建设也成为新时期我国推动“四化同步”发展的新要求^[53]。农业集约化过程的“投入—产—环境”综合效益，受种植方式的影响很大。例如，一季中稻的平均单产约为8.0 t/hm²，而双季水稻平均单产之和约为13.4 t/hm²（早稻6.5 t/hm²，晚稻6.9 t/hm²），二者的比例关系约为1:1.6^[54]。这说明种植两季能获得的产量一般小于种植一季能获得的产量的2倍（图3b），同时也印证了品种的DTM越长，单产一般会越高^[55]。受限于地块尺度种植频率与复种潜力观测，当前复种差研究只能基于“混合物”的前提开展。这意味着，即便在了解复种差的情况下（图2），也无法有效评估不同集约化措施的不同效果。如何在“投入—产—环境”综合维度提高集约化效益，是实现农业可持续发展需要考虑的一大难题^[56]，在复种差开发与利用的过程中，也需要综合考虑集约化过程的“权衡与协同”效应（tradeoff and synergy）。

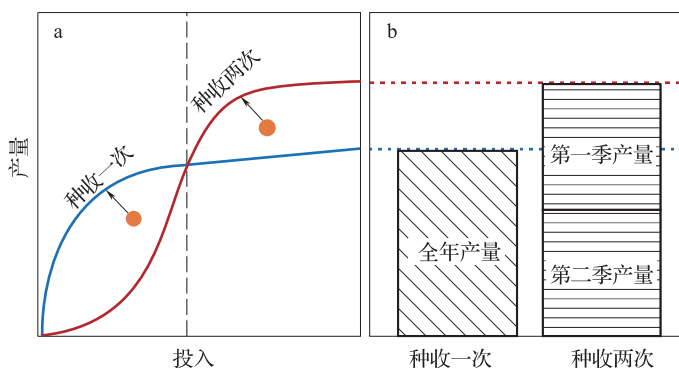


图3 不同种植方式的投入—产出关系（根据文献Wang et al. (2017)修改^[55]）

Fig.3 Input-output relation under different multi-cropping practices. (The figure is adopted from Wang et al., 2017)

5 复种差研究展望

综上所述，传统复种差研究大多基于复种指数开展，而这类研究的理论意义大于现实意义。笔者认为从地块尺度、种植频率的视角重新评估复种差将是未来研究的一个可

行模式。两种模式的具体差别体现在以下方面。

传统模式认为：复种差 = 潜力复种指数 - 实际复种指数。传统模式一般是直接将标准复种潜力与实际复种指数相减，考虑到标准复种潜力估算已经是取整之后的结果，即 LGP/标准 DTM (取整)，取整过程已经抹去了一定的“残值”。此外，标准情况下支持一年三熟的地块，在种收一季 DTM 较长的作物之后，复种差可能小于二；但如果采用间作套作等种植方式，并选择 DTM 较短的作物，则仍可能在这块地上继续种收两季 (图 1)。同时，标准情况无法包括所有情况，从而可能使评估结果存在系统误差 (biased estimation)，例如图 4 所示，在 LGP 足够长的地区，传统模式会认为所有种收 1 次的地块，都将存在 2 次复种差，然而，如果现有作物已经占用了相当长的 LGP，复种差也将随之减少。

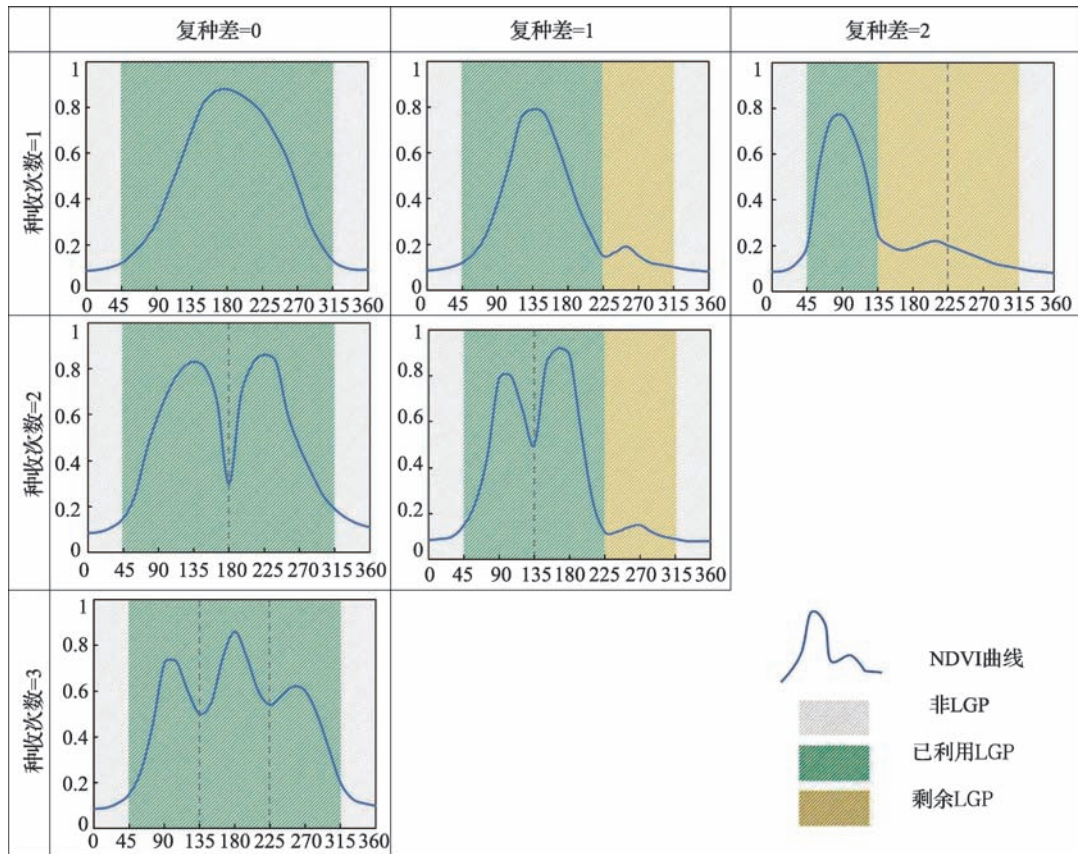


图 4 作物种植频率与复种差判定示意图

Fig.4 Illustration for cropping intensity gap based on different multi-cropping frequency

而地块模式将重新定义复种差：
$$\text{复种差} = \frac{\text{区域 LGP} - \text{地块现实作物 DTM}}{\text{潜在可选作物 DTM}}$$
 (取整)。地

块模式不仅指在地块尺度开展研究，更需考虑地块实际差异以及不同种植方式对复种差以及复种差利用的影响。复种差由此表现为对地块剩余 LGP 继续利用的可能性 (图 5)。如图 5a 所示，剩余 LGP=90d 的情况下，可选择标准作物继续集约化；如图 5b 所示，剩余 LGP 不足情况下，可选择标准作物加间作、套作等方式；如图 5c 所示，剩余 LGP 足

2018年10月

够长的情况下,可选择DTM较长的作物,以提高产量;如图5d所示,在剩余LGP不连续的情况下,无法直接继续集约化,需整体调整种植策略。

此外,在复种差评估基础上,地块模式还可服务于复种差利用方案的优化选择。如图3a所示,针对不同复种差利用方案,可利用作物模型等工具开展投入、产量、管理过程、环境效应等模拟。综合从LGP利用率、投入、产量、品质、环境影响等方面设置评价规则,分析不同方案下的“投入—产—环境”综合效益,为合理提高耕地集约化利用开展科学评估。

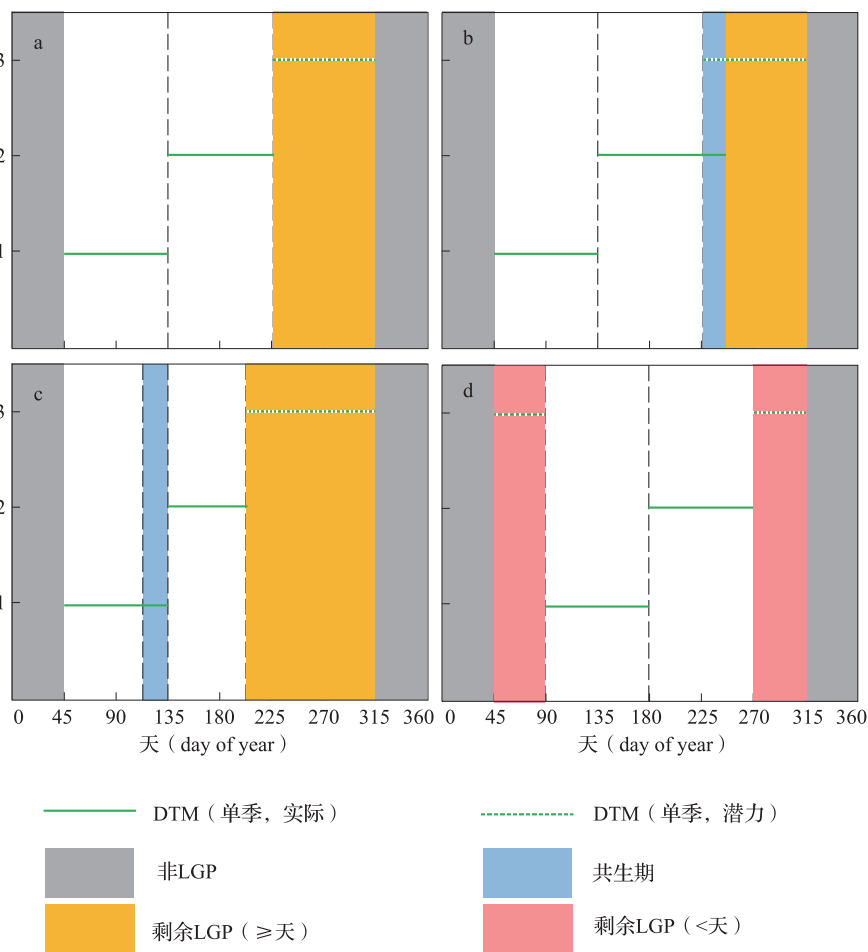


图5 复种差利用方案对比示意图

Fig.5 Illustration for different alternatives for filling the cropping intensity gap

6 结语

该文系统梳理了当前复种差研究的进展与问题,并从复种的原始意义出发,提出了一个地块尺度复种差研究的新模式。这一模式将具体探究以下关键科学问题:在了解区域复种指数差的前提下,复种差发生在哪些地块?发生在什么季节?进一步,如果填补

该复种差，从 LGP 占用的角度是否还存在可能？该选取何种作物？需采取何种种植方式？最后，在“投入—产出—环境”综合维度如何优化耕地集约化利用方案？

地块尺度复种差研究的核心理论是将复种差转换成作物 DTM 对区域 LGP 的动态利用程度，而不再是简单的将其等同于潜力复种指数与实际复种指数的静态差值。此外，地块尺度复种差研究具有较强的学科交叉性，可借鉴相关领域成熟的研究方法，如将种植频率提取（遥感）、物候期提取（遥感）、遥感作物分类（遥感）、以及 LGP 估算（农业气象）、产量模拟（农业气象）、投入产出分析（农业经济）等有机结合，创新性的应用于地理学（自然资源利用）研究。地块模式将有效填补复种差研究的“知识鸿沟”（knowledge gap），为优化资源利用方式，提高自然资源利用效率提供新的视角。

参考文献

- [1] Huang J., Yang G. Understanding recent challenges and new food policy in China. *Global Food Security*, 2017, 12: 119~126.
- [2] Brown L. R. State of the world 1991: a Worldwatch Institute report on progress toward a sustainable society. *WW Norton & Company*, 1992.
- [3] Ray D. K., Ramankutty N., Mueller N. D., et al. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature Communications*, 2012, 3: 1293.
- [4] Li K., Yang X., Liu Z., et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 2014, 59: 1~12.
- [5] He C., Liu Z., Xu M., et al. Urban expansion brought stress to food security in China: Evidence from decreased cropland net primary productivity. *Science of The Total Environment*, 2017, 576: 660~670.
- [6] Erb K., Haberl H., Jepsen M. R., et al. A conceptual framework for analysing and measuring land-use intensity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 464~470.
- [7] 刘巽浩. 论我国耕地种植指数(复种)的潜力. *作物杂志*, 1997(3): 1~3.
- [8] Iizumi T., Ramankutty N. How do weather and climate influence cropping area and intensity? *Global Food Security*, 2015, 4: 46~50.
- [9] Yang X., Chen F., Lin X., et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 76~84.
- [10] Ray D. K., Foley J. A. Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 44041.
- [11] Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. Global agricultural land resources—a high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. *PLoS one*, 2014, 9(9): e107522.
- [12] Zuo L., Wang X., Zhang Z., et al. Developing grain production policy in terms of multiple cropping systems in China. *Land Use Policy*, 2014, 40: 140~146.
- [13] Gray J., Friedl M., Froking S., et al. Mapping Asian cropping intensity with MODIS. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3373~3379.
- [14] Estel S., Kuemmerle T., Levers C., et al. Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(2): 24015.
- [15] Niedertscheider M., Kastner T., Fetzel T., et al. Mapping and analyzing cropland use intensity from a NPP perspective. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(1): 14008.
- [16] Seifert C. A., Lobell D. B. Response of double cropping suitability to climate change in the United States. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 24002.
- [17] Cohn A. S., VanWey L. K., Spera S. A., et al. Cropping frequency and area response to climate variability can exceed yield response. *Nature Climate Change*, 2016, 6(6): 601~604.
- [18] Spera S. A., Cohn A. S., VanWey L. K., et al. Recent cropping frequency, expansion, and abandonment in Mato Grosso, Brazil had selective land characteristics. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 64010.
- [19] Yu Q., van Vliet J., Verburg P. H., et al. Harvested area gaps in China between 1981 and 2010: effects of climatic and land management factors. *Environmental Research Letters*, 2018.

2018年10月

- [20] Wu W., Yu Q., You L., et al. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. *Land Use Policy*, 2018.
- [21] Yu Q., Wu W., You L., et al. Assessing the harvested area gap in China. *Agricultural Systems*, 2017, 153: 212~220.
- [22] Andrew R. H., Ferwerda F. P., Strommen A. M. Maturation and Yield of Corn as Influenced by Climate and Production Technique I. *Agronomy Journal*, 1956, 48(5): 231~236.
- [23] Singh K. B., Mehndiratta P. D. Genetic variability and correlation studies in cowpea. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding(The)*, 1969, 29(1): 104~109.
- [24] 吴连海, 韩湘玲. 生长期长度的计算与应用. *中国农业气象*, 1990, 11(4): 49~50.
- [25] 卞新民, 冯金侠. 多元多熟种植制度复种指数计算方法探讨. *南京农业大学学报*, 1999, 22(1): 11~15.
- [26] Li L., Sun J. H., Zhang F. S., et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 173~181.
- [27] 何文斯, 吴文斌, 余强毅, 等. 1980~2010年中国耕地复种可提升潜力空间格局变化. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(11): 7~14.
- [28] 范锦龙, 吴炳方. 基于GIS的复种指数潜力研究. *遥感学报*, 2004, 8(6): 637~644.
- [29] 查燕, 宋茜, 卫炜, 等. 基于NDVI时序数据的华北地区耕地物候参数时空变化特征. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(11): 1~9.
- [30] Yu Q., Shi Y., Tang H., et al. eFarm: A tool for better observing agricultural land systems. *Sensors*, 2017, 17(3): 453.
- [31] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. 耕地复种指数研究的国内外进展. *自然资源学报*, 2009, 24(3): 553~560.
- [32] 郭柏林. 我国复种指数变化特征、效益和潜力. *经济地理*, 1997, (3): 8~13.
- [33] 范锦龙, 吴炳方. 复种指数遥感监测方法. *遥感学报*, 2004, 8(6): 628~636.
- [34] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329~336.
- [35] 汪涌, 王滨, 马仑, 等. 基于耕地面积订正的中国复种指数研究. *中国土地科学*, 2008, 22(12): 46~52.
- [36] 谢花林, 刘桂英. 1998~2012年中国耕地复种指数时空差异及动因. *地理学报*, 2015, 70(4): 604~614.
- [37] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 近20年中国耕地复种指数的时空变化. *地理学报*, 2005, 60(4): 559~566.
- [38] 朱孝林, 李强, 沈妙根, 等. 基于多时相NDVI数据的复种指数提取方法研究. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 534~544.
- [39] 唐鹏钦, 吴文斌, 姚艳敏, 等. 基于小波变换的华北平原耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 220~225.
- [40] 彭代亮, 黄敬峰, 金辉民. 基于MODIS-NDVI的浙江省耕地复种指数监测. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1352~1357.
- [41] 左丽君, 董婷婷, 汪潇, 等. 基于MODIS/EVI的中国北方耕地复种指数提取. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 141~146.
- [42] 徐昔保, 杨桂山. 太湖流域1995~2010年耕地复种指数时空变化遥感分析. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 148~155.
- [43] Wilken F., Wagner P. D., Narasimhan B., et al. Spatio-temporal patterns of land use and cropping frequency in a tropical catchment of South India. *Applied Geography*, 2017, 89: 124~132.
- [44] Qiu B., Lu D., Tang Z., et al. Mapping cropping intensity trends in China during 1982~2013. *Applied Geography*, 2017, 79: 212~222.
- [45] 丁明军, 陈倩, 辛良杰, 等. 1999~2013年中国耕地复种指数的时空演变格局. *地理学报*, 2015, 70(7): 1080~1090.
- [46] 康清林, 李春蕾, 张玉虎. 2001~2010年江苏省复种指数变化及其影响因子分析. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2017(5): 86~94.
- [47] Li L., Zhao Y., Fu Y., et al. High Resolution Mapping of Cropping Cycles by Fusion of Landsat and MODIS Data. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1232.
- [48] Boryan C., Yang Z., Willis P., et al. Developing crop specific area frame stratifications based on geospatial crop frequency and cultivation data layers. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(2): 312~323.
- [49] Liu L., Xu X., Zhuang D., et al. Changes in the Potential Multiple Cropping System in Response to Climate Change in China from 1960~2010. *PLoS ONE*, 2013, 8(12): e80990.
- [50] You L., Wood S., Wood-Sichra U., et al. Generating global crop distribution maps: From census to grid. *Agricultural Systems*, 2014, 127: 53~60.
- [51] 余强毅, 吴文斌. 中国收获面积差及其产量潜力情景分析. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6): 21~26.
- [52] Pittelkow C. M., Liang X., Linquist B. A., et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 2015, 517(7534): 365~368.

- [53] 尹昌斌, 程磊磊, 杨晓梅, 等. 生态文明型的农业可持续发展路径选择. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1): 15~21.
- [54] Wang D., Huang J., Nie L., et al. Integrated crop management practices for maximizing grain yield of double-season rice crop. *Scientific Reports*, 2017, 7: 38982.
- [55] Liu Z., Hubbard K. G., Lin X., et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3481~3492.
- [56] 石淑芹, 曹玉青, 吴文斌, 等. 耕地集约化评价指标体系与评价方法研究进展. 中国农业科学, 2017, 50(7): 1210~1222.

Cropping intensity gap: a review

Yu Qiangyi, Xiang Mingtao, Xie Ankun, Shen Ge, Yang Peng, Wu Wenbin^{*}

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: [**Purpose**] Food production is determined by three fundamental factors: crop yield, cropland area, and cropping frequency. Facing the global pressures that crop yield increase is stagnating and fertile cropland areas are constantly shrinking, food production could be enhanced by the third measurement, i.e. closing the cropping frequency gap between the actual multi-cropping and the multi-cropping potential. [**Method**] This paper we reviewed the current research activities that are relevant to multi-cropping, multi-cropping potential and cropping frequency gap. [**Results**] We found that most of the existing researches used multi-cropping index (MCI) –measured by harvested area divides cropland area in a region—for the proxy of multi-cropping, and estimated the cropping intensity gap by subtracting the MCI by the PMCI (potential multi-cropping index). Both MCI and PMCI are the regional level measurements which ignore the field level details, suggesting that the existing estimations on cropping intensity gap are hardly able to inform intensification solutions for specific fields. In respect of the basic definitions of multi-cropping, the field level cropping intensity gap should be comprehensively determined by the Length of Growing Period (LGP) for the given region, the Date to Maturity (DTM) of individual crops, and the specific cropping approaches applied (or would be applied). However, none of the existing researches have paid attention to these aspects. Subsequently, an innovating framework is conceptualized to re-examine the cropping frequency gap, intensification options and production impact at a field level, by considering the interaction between LGP, DTM and LGP–remained. Computationally, the new framework measures the cropping intensity gap as: $GAP = (LGP - \text{actual DTM}) / \text{potential DTM}$, instead of the traditional measurement: $GAP = PMCI - MCI$. [**Conclusion**] Our new framework provides new perspectives for relevant researches in both terms of theory and methodology, and the research outcomes are supposed to update understandings on food production and cropland use intensification.

Key words: multi-cropping; multi-cropping index; cropping frequency; land use; land productivity potential; land intensification