

# 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用

闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 中国政府高度重视粮食安全, 采取一系列措施提高粮食生产并取得了一定的成效, 但是 20 世纪 90 年代全球农业生产徘徊不前并不仅是一种由特定政策或市场因素导致的短期现象。因此, 认识在长时间尺度上农田生产力变化的特征及其控制因素对保障国家粮食安全、制定农业政策及调节生态系统服务功能具有重要意义, 研究稳定少动但对农田生产力形成有重要影响的地形因子对农田生产力变化的作用是其中的一项重要内容。生态系统生产力遥感机理模型能够清晰地表达国家尺度农田生产力的时空格局, 应用 1981~2000 年的 NOAA/AVHRR 卫星遥感数据驱动 GLO-PEM 模型, 以 10 年为时间尺度分析 20 世纪 80 年代到 90 年代农田生产力变化的空间格局特征。研究结果表明, 在 10 年的时间尺度上, 地形特征控制着农田生产力变化空间格局分异规律, 农田生产力降低的几率随地形起伏度增大而增加, 山区耕地发生生产力下降的可能性比平原耕地高 10%~30%。在研究时期内尽管中国农田生产力总量增加, 但仍有 24% 的农田发生农田生产力下降, 其中 71% 在丘陵山地, 尤其是地形起伏破碎的黄土高原及云贵高原地区。

**关键词:** 农田生产力; 遥感; 光能利用率; 地形; 区域分异; 中国

## 1 引言

中国政府长期以来高度重视粮食安全且通过采取一系列措施成功保障了粮食供给。然而, 自 1998 年我国粮食总产达到历史最高以后, 粮食生产的连续 5 年下降再次引起国际社会的关注, 虽然政府已采取一系列应急措施以恢复和提高粮食生产, 但是 20 世纪 90 年代农业生产徘徊不前是一个全球性问题, 其原因和背景与全球变化密切相关, 并非我国特有的问题, 也不是一种由特定政策或市场因素导致的短期现象<sup>[1]</sup>。因此, 以 10 年为时间尺度分析农田生产力变化的格局与特征, 认识在长时间尺度农田生产力变化的主导控制因素对农业可持续发展和国家粮食安全对策的中长期规划具有重要意义。

目前, 在区域或全国尺度对影响农田生产力年际变化的气候、管理、政策等因素已有较多研究, 研究结果使我们认识到气候变化、城市扩张、化肥过度使用等对粮食安全的潜在危险<sup>[2-4]</sup>; 但对于稳定少动的因素, 如地形, 对国家尺度农田生态系统的供给能力变化的作用并不很了解。其主要原因在于已有研究大多数都是基于农业统计数据或站点观测数据, 不能清晰表达农田生产力状况的空间格局, 因此限制了对不同区域农田生产力变化的主要控制因素的辨识。

遥感是在区域尺度上观测土地利用 / 土地覆被、植物生长状况实际变化的有效手段, 能够探测气候因子 (如光、温度、降雨等), 土壤 (如营养元素、土壤质地、有机物分解、呼吸过程) 和人为因素 (土地利用和管理) 的综合作用。随着遥感技术以及数据处理能力的迅速发展和基于遥感观测的生理生态理论研究的进展, 基于遥感观测的生态系统净初

收稿日期: 2006-06-28; 修订日期: 2006-10-10

基金项目: 中国科学院百人计划; 国家自然科学基金项目 (40601064) [Foundation: "Hundred Talents" Project of CAS; National Natural Science Foundation of China, No.40601064]

作者简介: 闫慧敏 (1974-), 女, 博士后, 主要从事土地利用变化及其生态环境效应研究。E-mail: yanhm@lreis.ac.cn

级生产力 (NPP, Net Primary Productivity, 单位:  $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ) 研究已经开始应用于实时、连续监测和年际波动和长期变化趋势的探测<sup>[5-7]</sup>。NPP 指绿色植物在单位时间和单位面积上所能累积的有机干物质, 包括植物的枝、叶和根等生产量及植物枯落部分的数量, 它能够以统一的尺度标准体现生态系统生产力, 是很好的农田生产力衡量指标, 避免了以作物产量衡量农田生产力时由于农业结构调整, 作物品种变化等的干扰。本研究以 1981~2000 年空间分辨率为 8 km、时间分辨率为 10 天的 NOAA/AVHRR 遥感观测数据驱动生态系统生产力遥感模型 GLO-PEM, 估算 1981~2000 年中国农田生态系统净初级生产力 (NPP), 分析 80 年代和 90 年代之间农田生产力的变化和空间分异特征, 探讨地形因子对农田生产力变化的控制作用。

## 2 研究方法

### 2.1 GLO-PEM 模型

GLO-PEM 是一个主要由遥感观测数据驱动的生产力效率模型, 由描述冠层辐射吸收、利用、自养呼吸以及这些过程如何受环境条件控制等几个相互联系的部分组成<sup>[7-9]</sup>。GLO-PEM 模型几乎完全用遥感数据驱动, 所以能够对植被生产力进行高分辨率估计。

在 GLO-PEM 中, 对 NPP 计算表示为:

$$NPP = \sum_t [(S_t N_t) \varepsilon_g - R] \quad (1)$$

式中:  $S_t$  为  $t$  时刻入射光合有效辐射 (PAR),  $N_t$  为植被吸收光合有效辐射的比例 FPAR,  $\varepsilon_g$  为植被吸收的光合有效辐射的有机物转化率 (光能利用率),  $R$  为植物自养呼吸。

光能利用率  $\varepsilon_g$  可以由下式计算得到:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_g^* \cdot f(g_s) \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_g^*$  为潜在光能利用率, 受温度、光合途径和大气中  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  等条件的影响<sup>[8]</sup>。 $f(g_s)$  为气孔导度对环境因子的响应函数。

在  $\text{CO}_2$  光合同化过程中对植物吸收的光合有效辐射的利用效率影响最强的环境因子是空气温度、土壤水分含量和饱和水汽压差, 它们都会通过影响气孔导度进而影响  $\text{CO}_2$  同化。

$$f(g_s) = f(T)f(\delta q)f(\delta\theta) \quad (3)$$

式中:  $f(T)$ 、 $f(\delta q)$ 、 $f(\delta\theta)$  分别表示温度、饱和水汽压差 (VPD)、土壤水分对气孔导度的影响。模型的原理及各个变量的计算方法在 Prince (1995)<sup>[8]</sup>、Goetz (1999)<sup>[9]</sup> 和 Cao (2004)<sup>[7]</sup> 的文章中有详细的描述。

### 2.2 模型运算及数据处理

本研究应用空间分辨率 8 km, 时间步长为 10 天的 Pathfinder AVHRR Land (PAL) 的 NOAA 7、8、11 和 14 号卫星的 1、2、4、5 通道的数据作为模型输入数据估算 NPP, 将每年 36 个旬的 NPP 相加得到每年的农田生态系统净初级生产力; 利用农业统计数据的产量及播种面积计算 NPP 对模型估算结果进行比较验证; 用 10 年的平均值分析 20 世纪 90 年代与 80 年代两个 10 年间农田生产力的变化。耕地分布资料来自于中国 90 年代中期土地利用 1 km 栅格成分数据集<sup>[10]</sup>, 该数据集是由覆盖全国的具有 30 m 分辨率的 TM 数据 (部分地区采用 20 m 分辨率的中巴资源卫星数据), 采用人机交互式图像解译制作的 1:10 万土地利用图栅格化后得到的。每个成分栅格记录了 1 km 栅格内各类土地利用类型所占的面积比例。本研究将 1 km 成分栅格综合至 8 km, 使之与 AVHRR 数据空间精度相互

匹配，然后以栅格中耕地所占比例最大为依据提取耕地。

### 3 GLO-PEM 模型结果及验证

#### 3.1 农田生产力的空间分布格局

我国的农田生产力呈西北低、东南高的趋势，华南区和长江中下游地区生产力最高，NPP 大于 800 gCm<sup>-2</sup>，其次为黄淮海平原和西南区的四川盆地，东北区具有较高农田生产力，黄土高原、内蒙及长城沿线区、青藏区和甘新区农田生产力最低 (图 1)。从各省的统计结果看，农田生产力高于 800 gCm<sup>-2</sup> 的省有福建、广西、广东和海南省，内蒙古、新疆、甘肃、青海、西藏和宁夏生产力低于 200 gCm<sup>-2</sup>，山西和四川农田生产力接近于 400 gCm<sup>-2</sup>，其余的大部分省市区的 NPP 都在 400~800 gCm<sup>-2</sup> 之间。

#### 3.2 根据统计数据中作物产量估算 NPP 的方法

农业统计数据包含每一个县级区域的数据，所以统计数据是进行国家尺度上农田生产力估算结果验证的一个重要数据来源。由农业统计中的产量、面积等资料估算 NPP 原理是根据不同作物的收获部分的含水量和收获指数 (经济产量与作物地上部分干重的比值) 将农业统计数据的产量转换成植被碳储量。从主要作物县级统计收获数据到县级平均 NPP 的转换方法可以用下面公式表达<sup>[11]</sup>：

$$NPP = \sum_{i=1}^N \frac{Y_i * (1 - MC_i) * 0.45 \frac{gC}{g}}{HI_i * 0.9} \bigg/ \sum_{i=1}^N A_i$$

(4)

式中： $Y_i$  是统计数据中作物  $i$  的产量， $MC_i$  是作物收获部分的含水量， $HI_i$  是作物  $i$  的收获指数， $A_i$  是作物收获面积。式中的作物产量和收获面积分别来自于中国自然资源网提供的中国农业统计数据中的 8 大类主要农作物的产量和播种面积，作物收获部分的含水量和收获指数<sup>[11, 12]</sup> (表 1)。

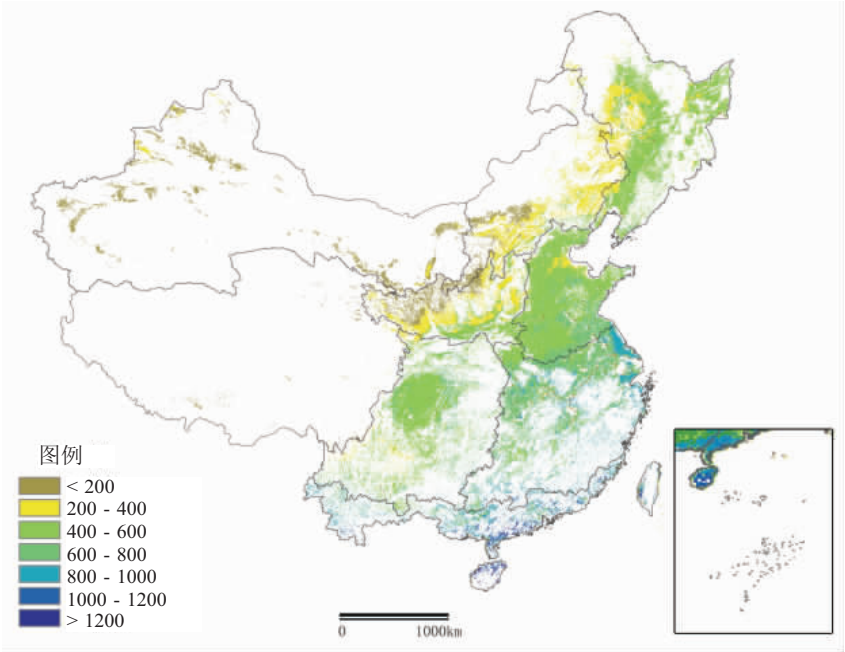


图 1 中国农田生产力分布格局 (单位：gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)  
Fig. 1 Spatial Patterns of Chinese Agricultural Net Primary Productivity (unit: gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)

### 3.3 模型估算的 NPP 与根据作物产量估算的 NPP 的比较

应用上述方法，我们用 1996 年全国分县统计数据计算的 NPP 与基于遥感数据估算的 NPP 进行了比较。对于县级统计数据，为了避免耕地布局分散、面积小的区域的误差，首先选择耕地面积占县域面积比例大于 30% 的县，然后从中剔除县域内耕地栅格数少于 100 (相当于耕地面积小于 100 km<sup>2</sup>) 的县，保留的 1171 个县参与模型的验证。为了避免混合像元的干扰，对于遥感模型估算的 NPP，成分栅格中耕地面积比例大于 50% 的栅格参与模型的验证。所选的 1171 个县的由 GLO-PEM 估算的 NPP 和由统计数据估算的 NPP 呈极显著相关 (图 2)。

## 4 结果与分析

### 4.1 各农业生态区农田生产力的变化

中国农田生产力 (NPP) 从 20 世纪 80 年代到 90 年代总体增加，约增长 29.7 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>，大部分地区 90 年代较 80 年代农田生产力提高，占总面积的 76%。黄土高原、甘新区、西南区和东北区增长明显低于华南区、长江中下游区、内蒙古及长城沿线区和黄淮海区，而且呈现农田生产力增加的耕地面积也相对较少。其中，NPP 增加最多 (64.5 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)、增加耕地面积最广 (97% 的耕地) 的位于黄淮海区，其次是内蒙古及长城沿线区，NPP 增加 42.3 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>、92% 的耕地发生生产力增长；华南、长江中下游区增幅也较高，分别为 31.7 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup> 和 38.9 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。增幅最低、面积比例最小的是黄土高原区，仅有 3.7 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup> 的微弱增长，而且在一半的土地上发生了农田生产力下降；其次是甘新区，NPP 仅增长 7.32 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>、有 34% 的耕地农田生产力降低；西南区和东北区 NPP 分别增长 10.1 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup> 和 14.9 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。

### 4.2 地形控制作用下农田生产力变化的空间格局特征

坡耕地易于发生水土流失进而导致土壤贫瘠化，地形起伏是导致水土流失的最直接因素。在大比例尺 (坡面尺度) 研究中，坡度是主要的地形指标，但是在国家或区域尺度，随着地形信息载体 (地形图、DEM) 比例尺或分辨率的减小，坡度将只有数学意义而不具备土壤侵蚀和地貌学意义。我国地域广大，地貌类型复杂多变，地形起伏度是指地面一定距离范围内最大的高程差，其实质仍是坡度概念的一个延伸，被作为区域水土流失评价的地形指标<sup>[13]</sup>。地形起伏度小于 30 m 的定义为平原，大于 30 m 的为定义为丘陵山地<sup>[13]</sup>。本研究以全国 1 km 的 DEM 为基础，以 8 km×8 km 为分析窗口，提取中国地形起伏度。

中国有 55% 的耕地位于丘陵山地，这里也是发生农田生产力降低的主要地区，占有发生降低的耕地面积的 71%。在平原地区的耕地有 15% 发生了生产力降低，而在山区发生农田生产力降低的耕地比例是平原区的 2 倍。黄土高原区和西南区是农田生产力降低面积比例最高的地区 (图 3)，分别达耕

表 1 主要农作物的收获指数及含水量

Tab. 1 Harvest index and moisture content of major crops

作物	MC (%)	Hi
稻谷	14	0.38-0.51
小麦	12.5	0.28-0.46
玉米	13-14	0.45-0.53
豆类	12-13	0.2-0.3
薯类	80	0.5
棉花	8.3	0.3-0.4
油菜	9-18	0.21-0.3
糖料 (甜菜)	85	0.4

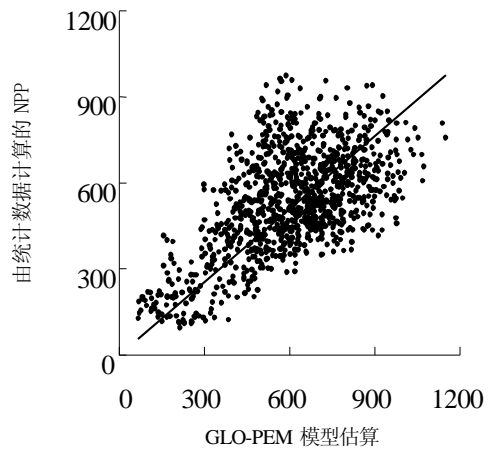


图 2 GLO-PEM 估计值与由分县统计数据计算的 NPP 比较 (单位: gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)

Fig. 2 Comparison of NPP from GLO-PEM with county statistics based on NPP (unit: gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)



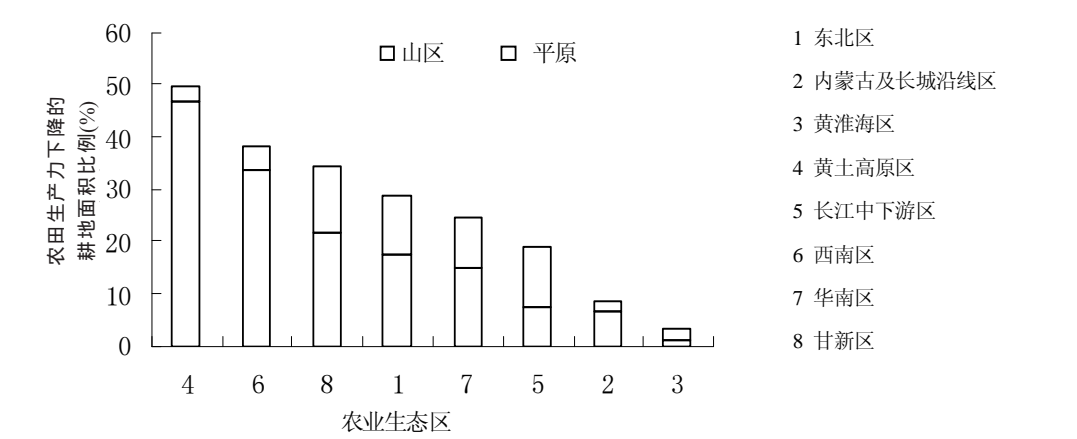


图 3 中国不同地形条件下各农业区农田生产力下降耕地面积比例

Fig. 3 Proportion of cropland area with decrease of NPP under different topographic conditions

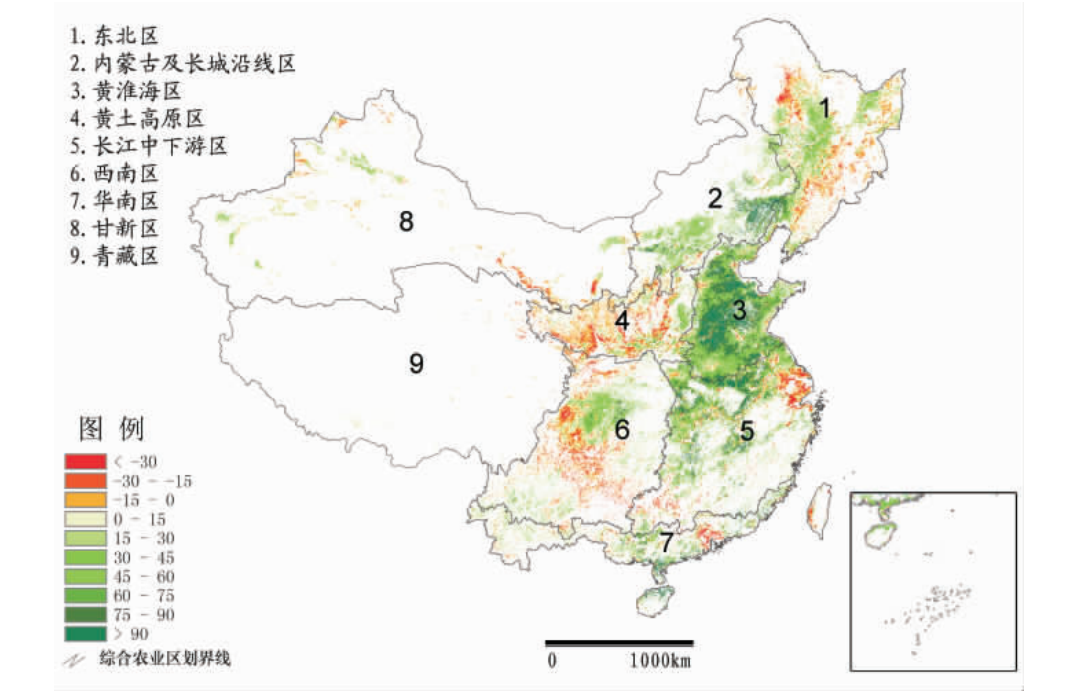


图 4 20 世纪 80 年代到 90 年代中国农田生产力变化空间格局 (单位:  $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ )

Fig. 4 Map of agricultural productivity variation in China from the 1980s to 1990s (unit:  $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ )

地总面积的 49.7%和 38.2%，尤其是在黄土高原和云贵高原大面积连片的耕地生产力在下降(图 4)。这两个区都是我国水土流失最为严重的地区，黄土高原由于其沟壑纵横且黄土易受侵蚀的特点是风蚀水蚀都非常剧烈的地区，云贵高原是山地多、地形陡峭、土地贫瘠的石灰岩地区，而且这两个区域有 90%以上的耕地都位于丘陵山地，这些地区水土流失面积逐年增加<sup>[14, 15]</sup>。粗放的坡地耕作易导致耕地退化，在黄土高原和西南区的丘陵山区生产力降低的耕地占有所有生产力降低的耕地的面积比例的 93.5%和 88.5%，西南区生产力降低的耕地主要集中在云贵高原(其中的四川盆地地区生产力上升)。甘新区有 34.4%的耕地生产力降低，面积比例仅次于西南区；东北区、华南区也分别有 28.7%和 24.6%的耕地生产力降低，在这三个区域发生生产力降低的耕地中都有 60%左右是发生在丘陵山地，

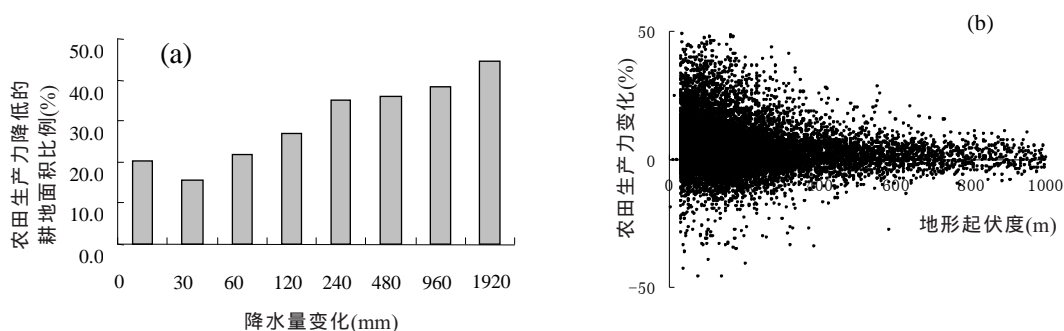


图 5 不同地形条件下农田生产力变化

Fig. 5 Variability of agricultural productivity under different topographical conditions

但其中甘新区和东北区丘陵山区耕地下降比例高达 47% 和 41%。东北平原生产力虽大部分有所提高, 但是增加程度都相对较弱, 仅有黄淮海平原和长江中下游平原增长的 1/2 (图 4)。长江中下游区、内蒙古及长城沿线区和黄淮海平原生产力下降的耕地较少, 尤其是黄淮海平原仅有 3.4% 的耕地生产力下降呈零星分布, 且生产力普遍有较高的增长; 长江中下游区有 19% 耕地生产力下降, 但是多发生在平原 (62%), 集中在经济活动最活跃的长江三角洲地区。内蒙古及长城沿线区尽管生产力降低的耕地面积不多 (占 8.3%), 但是有 81% 都是山区耕地。可见除长江中下游区和黄淮海区外, 在其他 6 大农业区农田生产力降低主要发生在位于丘陵山地的耕地。

图 5 表明耕地生产力变化的程度与范围受到地形因素的控制, 总体上随着地形起伏度的增加, 耕地发生生产力降低的可能性会随之增大, 地形起伏度大于 240 m 的山区耕地生产力降低的几率要比地势平坦处 (地形起伏度小于 60 m) 的耕地高 2~3 倍 (图 5a); 即使是农田生产力没有发生降低的丘陵山区耕地, 随着地形起伏度增加, 农田生产力增加的幅度也随之递减 (图 5b)。

#### 4.3 地形对降水变化对农田生产力影响的控制作用

降水是决定山区农业生产的重要因素, 通过影响水分条件和养分运移等直接或间接地作用于农田生产力。我们应用中国气象局约 730 个站点的 1981~2000 年的降水资料用 ANUSPLIN 气候插值软件进行内插得到的与遥感资料空间匹配的降水数据分析降水与农田生产力变化的关系。在北方农业区 (东北区、内蒙古及长城沿线区、黄淮海区、黄土高原区) 的丘陵山地, 农业生产几乎都是雨养农业, 降水变化与生产力变化正相关, 降水减少耕地生产力下降, 降水增加的区域几乎没有发生农田生产力降低的耕地 (图 6), 降水减少越强烈, 生产力降低的几率越大; 降水减少 60 mm 的区域的耕地生产力降低可能性要比降水不发生变化的区域高 20%, 而降水增加将会有效防止耕地生产力降低, 在降水增加 60 mm 的区域, 农田生产力降低的可能性比降水不变的区域低 30%~40% (图 7)。在降水充足的南方农业区 (长江中下游区、西南区、华南区) 丘陵山地则不同于北方, 耕地生产力变化与降水变化并没有明显的相关关系, 降水增加和减少区域都有生产力降低的耕地, 且变化幅度较小 (图 6); 但是不同降水变化幅度导致的土壤侵蚀乃至耕地退化程度不同, 因此耕地生产力降低的几率也不同, 除了在降水减少多于 60 mm 的区域耕地生产力降低几率较高外, 与北方相反, 在降水增加的区域, 耕地生产力降低的可能性比降水减少 20~40 mm 的区域高 (图 7)。然而无论南方还是北方农业区, 地形条件对降水变化对丘陵山地农田生产力的影响具有控制作用, 总体上随着地形起伏度增大耕地生产力降低的可能性随之增加, 在南方农业区地形起伏度大于 480 m 的丘陵山区耕地退化更容易发生 (图 7)。

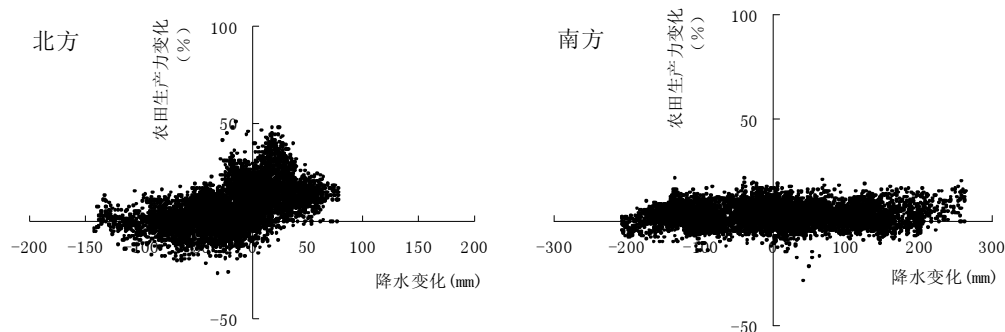


图 6 中国北方 (左)、南方 (右) 丘陵山地农业区降水变化与农田生产力变化的关系  
Fig. 6 Agricultural productivity variability with precipitation variation in southern (right) and northern China

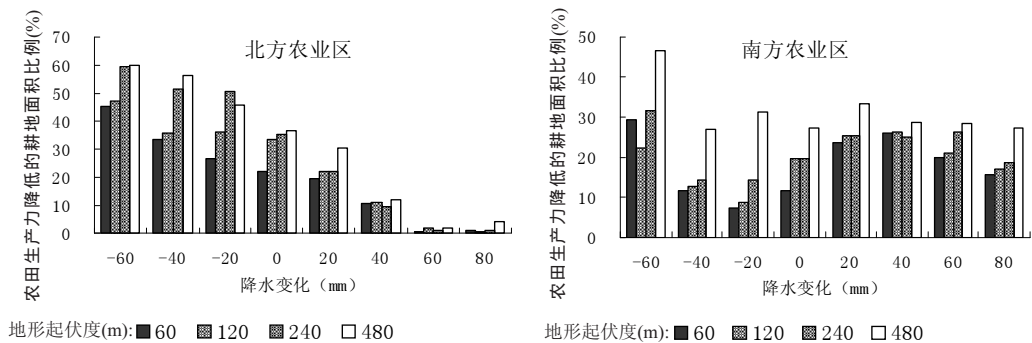


图 7 降水变化和地形对农田生产力的作用  
Fig. 7 Impacts of precipitation variation and topography on agricultural productivity

在降水量减少 0~60 mm 的地区，随着地形起伏度增加，南方和北方农业区农田生产力降低的耕地面积比例都明显增加。在降水增加小于 60 mm 的情况下，除地形起伏度大于 480 m 的耕地农田生产力降低几率远高于相对平缓地形处的耕地外，不同地形条件下生产力变化没有显著差异，但南方由于降水增加，土壤侵蚀更加强烈，而北方则在一定程度上缓解了干旱，使得南方生产力降低的几率比北方高 10%~20%。

5 结论与讨论

5.1 结论

农田生产力的形成受多种因素的综合影响，包括光照、温度、降水、土壤、地形等自然条件，和农田管理措施等人为因素，遥感观测信息是综合了所有自然条件和人为因素共同作用于作物生长的客观、真实反映。本研究用生态系统生产力遥感机理模型估算净初级生产力，以 10 年为研究尺度分析农田生产力变化的空间格局及不同地形条件下农田生产力发生下降的可能性，揭示在较长时间尺度上农田生产力变化的空间分异规律及地形的控制作用，认识地形因素对国家粮食安全及可持续发展的意义。

研究结果表明，从 20 世纪 80 年代到 90 年代，尽管总体上各农业区生产力都有所提高，但各个农业区都有部分耕地生产力下降，占耕地总面积的 24%。除长江中下游区和黄淮海区外，农田生产力降低主要发生在丘陵山区耕地。

地形特征是 10 年尺度上导致农田生产力变化空间格局分异的主要原因，有 71% 的生

产力降低的耕地属于地形起伏度大于 30 m 的丘陵山区。黄土高原区和西南区是农田生产力降低幅度最大、面积最广的区域,尤其是在黄土高原和云贵高原大面积连片的耕地生产力在下降,分别达耕地总面积的 49.7%和 38.2%。

随着地形起伏度增大,耕地生产力降低的几率随之增加。尽管降水影响北方以雨养农业为主的丘陵山区农田生产力变化动态,但其作用的空间格局及分异特征受地形因素控制。在研究时段,占我国耕地面积 55%的地形起伏度大于 30 m 的山区耕地是易于发生农田生产力降低的脆弱区,这些地区土地退化的可能性比平原耕地高 10%~30%。在农田生产力没有发生降低的丘陵山区耕地,随着地形起伏度的增加,农田生产力增加的幅度也随之递减。

## 5.2 讨论

遥感被认为是综合了所有自然条件和人为因素共同作用于作物生长的客观、真实反映,但是由于土地覆被及作物布局的空间异质性使得空间分辨率为 8 km 的 AVHRR 数据中的混和像元会影响农田生产力估计结果的精度。我们是在中国资源环境数据库 1:10 万土地利用数据集的基础上首先生成 8 km 成分栅格,然后以栅格中耕地所占比例最大为依据提取耕地;由于中国地形复杂,耕地成分 70%以上的像元只有 45%,50%以上的有 75%,分布在丘陵山地区的耕地成分 70%以上的像元只有 27%,50%以上的有 65%,因此在耕地大面积成片分布的平原精度高于丘陵山地。应用遥感模型估计农田生态系统 NPP 的不确定性原因还来自于对模型中光能利用率机理的认知与定量表达和输入多时相遥感数据对作物生长过程的描述,模型不能表达不同尺度过程相互作用决定的生态系统整体功能。因此,尽管本研究方法能够表达全国尺度农田生产力变化的时空特征,但是要实现应用生产力遥感模型进行农田生产力动态监测还需要进行深入研究,减少模型的不确定性。

农田生产力受土地利用及管理、气候、土壤性质等诸多因素的影响。城市快速扩张导致的耕地面积变化被归咎为威胁中国粮食安全的重要原因<sup>[16]</sup>,一些对耕地土壤有机质的研究<sup>[17-20]</sup>表明,土壤有机质变化的区域特征可能是导致在高强度投入实现了粮食生产普遍提高的情况下农田生产力的变化趋势却出现区域差异的原因之一。本研究也证明了珠江三角洲、长江三角洲等地区城市化进程对农业生产的负面影响,东北平原农田生产力增加幅度低于黄淮海平原和长江中下游平原等。但是土地利用与管理、种植制度变化对农田生产力的影响并非本文所能涵盖,本文旨在阐明除耕地面积变化等因素对粮食安全的威胁之外,地形对农田生产力变化的控制作用也是值得重视的重要问题。1999 年开始启动实施的退耕还林草政策已对陡坡耕地进行保护,由于多数退耕的土地农田生产力水平低下,在国家尺度上对粮食安全并未构成威胁,仅对部分省或县的粮食供给有影响<sup>[21, 22]</sup>。然而,我国耕地面积一半以上位于丘陵山地,由于农田生产力受气候波动和农业管理措施的调节,其中大部分耕地短时间内表现不出地形条件对生产力变化影响的规律<sup>[23]</sup>,但在 10 年的尺度上,地形却成为农田生产力的主要限制因素。地形通过调节水热状况控制生态系统生产力变化的时空格局,不同土壤性质(有机质含量、土壤母质特性等)对地形控制的响应也不相同。在当前气候变化对粮食生产的研究中,很少有研究考虑到地形对生产力变化的控制作用<sup>[24]</sup>,这可能会导致对未来粮食生产潜力的偏高估计,因此,研究中应该进一步深入研究地形对生产力控制机制并对其进行模拟以准确把握农田生产力的可能变化趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] Cao Mingkui. Challenges of climate change on agricultural system and food security. Science Times, 2004-05-13. [曹明奎. 气候变化挑战农业系统和食物安全. 科学时报, 2004-05-13.]
- [2] Li Xiubin. Change of arable land area in China during the past 20 years and its policy implications. Journal of Natural



- Resources, 1999, 14(4): 329-334. [李秀彬. 中国近 20 年来耕地面积的变化及其政策启示. 自然资源学报, 1999, 14 (4): 329-334.]
- [3] Qin Dahe. Impacts of climate change on agricultural production. People's Daily, 2000-01-30. [秦大河. 气候变化对农业生产的影响. 人民日报, 2000-01-30]
- [4] Tong C L, Charles A S, Hall, Wang H Q. Land use change in rice, wheat and maize production in China (1961-1998). Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 95: 523-536.
- [5] Potter K N, Torbert H A, Johnson H B et al. Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils. Soil Science, 1999, 164(10): 718-725.
- [6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300: 1560-1563.
- [7] Cao M K, Prince S D, Small J et al. Satellite remotely sensed interannual variability in terrestrial net primary productivity from 1980 to 2000. Ecosystems, 2004, 7: 233-242.
- [8] Prince S D, Goward S N, Global primary production: A remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22: 815-835.
- [9] Goetz S J, Prince S D. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach. Ecological Modelling, 1999, 122: 239-255.
- [10] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. Science in China (Series D), 2003, 46(4): 373-384.
- [11] Lobell D B, Hicke J A et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in the United States agriculture, 1982-1998. Global Change Biology, 2002, 8: 722-735.
- [12] Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon Stock of Terrestrial Ecosystem in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1996. 109-128. [方精云, 刘国华, 徐高岭. 中国陆地生态系统的碳库. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109-128.]
- [13] Liu Xinhua, Yang Qinke, Tang Guo'an. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 57-60. [刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-60.]
- [14] Wan Jun. Land degradation and ecological rehabilitation in karst areas of Guizhou province. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 447-453. [万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展. 地球科学进展, 2003, 18 (3): 447-453.]
- [15] Zhang Jianping. Study on land degradation characteristics of different types in mountain areas in Southwest China. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(3): 236-241. [张建平. 西南地区山地不同土地退化类型特征及调控途径. 地理科学, 2001, 21(3): 236-241.]
- [16] FAO. Food Insecurity: When People Must Live with Hunger and Fear Starvation. The State of 2002. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2002, Rome, Italy.
- [17] Wang Wei, Li Xiubin. Study on the marginal productivity of cultivated land with change of soil organic matter in China. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(1): 25-29. [王卫, 李秀彬. 中国耕地有机质含量变化对土地生产力影响的定量研究. 地理科学, 2002, 22(1): 25-29.]
- [18] Yu Hai, Huang Jikun, Rozelle S et al. Soil fertility changes of cultivated land in eastern China. Geographical Research, 2003, 22(3): 380-388. [俞海, 黄季焜, Scott Rozelle. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究. 地理研究, 2003, 22 (3): 380-388.]
- [19] Liu Hui. Type and characteristics of land degradation and countermeasures in China. Resources Science, 1995, 17(4): 26-32. [刘慧. 我国土地退化类型与特点及防治对策. 资源科学, 1995, 17(4): 26-32.]
- [20] Feng Zhiming, Li Xianglian. The stratagem of cultivated land and food supplies security: storing food in land-raising the comprehensive productivity of land resource of China. Geography and Territorial Research, 2000, 16(3): 1-5. [封志明, 李香莲. 耕地与粮食安全战略: 藏粮于土, 提高中国土地资源的综合生产能力. 地理学与国土研究, 2000, 16(3): 1-5.]
- [21] Feng Z M, Yang Y Z, Zhang Y Q et al. Grain-for-green policy and its impacts on grain supply in West China. Land Use Policy, 2005, 20(4): 301-312.
- [22] Xu Z, Xu J, Deng X et al. Grain for green versus grain: Conflict between food security and conservation set-aside in China. World Development, 2006, 34(1): 130-148.
- [23] Yan H M, Liu J Y, Cao M K et al. Remotely-sensed changes in agricultural productivity in China from the 1980s to the 1990s. SPIE, 2004, 5544: 319-327.
- [24] Parry M L, Rosenzweig C, Iglesias A et al. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. Global Environmental Change, 2004, 14(1): 53-67.

# Spatial Pattern and Topographic Control of China's Agricultural Productivity Variability

YAN Huimin, LIU Jiyuan, CAO Mingkui

*(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** Being home to one of every five people in the world, China always put the food security issue high on its agenda and has successfully provided adequate food for its people. However, the stagnation of global agricultural production during the 1990s is not a short-term phenomenon caused by policies or market. Therefore, it is significant for food security, agricultural policy making and ecosystem service functions adjustment to recognize the variability of agricultural productivity and its predominant controlling factors at decadal temporal scale. The effect of topography on agricultural productivity variation has been poorly understood due to the lack of spatially explicit agricultural productivity information. In this study, the agricultural productivity variation and its spatial heterogeneity between the 1980s and 1990s are analyzed using a satellite-based production efficiency model (GLO-PEM) driven with NOAA/AVHRR data. It is shown that spatial heterogeneity of agricultural productivity variability was predominantly controlled by the topographic conditions at decadal scale. The proportion of cropland area occurring in agricultural productivity reduction increased with the amplifying relief, and consequently, the probability of cropland in hilly areas suffering from agricultural productivity reduction was 10% -30% higher than cropland in plain areas. Although the total agricultural production had increased in each agricultural region of China during 1981-2000, there were parts of cropland area suffering from reduction of agricultural productivity, accounting for 24% of the total cropland area. In those croplands with decreased agricultural productivity, 71% were located at hilly areas, particularly on the Loess Plateau and Yunnan-Guizhou Plateau areas.

**Key words:** agricultural productivity; remote sensing; light use efficiency; topography; regional analysis; China