

# 基于MODIS数据的中国耕地高中低产田 空间分布格局

冀咏赞<sup>1,2</sup>, 闫慧敏<sup>1</sup>, 刘纪远<sup>1</sup>, 匡文慧<sup>1</sup>, 胡云锋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 人口的持续增长和食物消费水平的快速提升使得中国粮食自给问题越发受到关注。后备土地资源补给能力的不足和城市化过程对优质耕地的占用使得耕地资源“开源”和“节流”均存在一定困难, 因此, 提高耕地资源利用效率、提升耕地生产能力成为当前中国农业发展的根本策略, 清晰地掌握全国高中低产田在空间上的分布区域成为国家中低产田改造与高标准农田建设规划的必要前提。本研究应用空间分辨率 500 m 的 MODIS 遥感数据和光能利用率模型, 在空间上清晰地估算现实农田生产力的基础上, 结合高分辨率的耕地分布数据和耕作制度区划信息, 探索新的高中低产田划分方法, 掌握中国高中低产田的空间分布格局。该方法既能体现耕地资源条件的区域分异规律, 也能表达耕地现实生产能力的空间差异性, 并且有效克服了利用统计数据进行中低产田划分时以县为统计单元导致的县内高中低产田格局不明确的问题。基于该方法划分的高中低产田分别占全国耕地面积的 20.66%、39.56% 以及 39.78%。其中, 低产田约有 3/4 分布于丘陵山地区; 高产田则 53% 分布于平原区。高产田面积最大的五个省均位于黄淮海区域内, 其面积总和占全国高产田面积的 41.75%。耕地面积位列全国前三的黑龙江省、四川省和内蒙古自治区其高产田面积占比均不足 15%。

**关键词:** 粮食安全; 光能利用率模型; 农田生产力; 高中低产田

DOI: 10.11821/dlxb201505008

## 1 引言

人口和粮食消耗的不断增长给农业和自然资源资源带来了极大的压力, 需要更高的粮食产量来保证未来全球的粮食安全<sup>[1]</sup>。目前, 农业用地约占陆地面积的 38%, 是占地面积最大的土地利用方式<sup>[2-3]</sup>; 而农业发展导致生物多样性下降、温室气体排放增多、环境污染等诸多问题, 目前已成为导致全球环境退化的主要原因<sup>[1, 4-5]</sup>。因此, 从长远发展来看, 全球农业面临着在保障粮食供给的同时减弱其对全球环境的负面影响这一挑战<sup>[1, 4-9]</sup>。

目前许多耕地的粮食产量远低于其所处气候条件下的耕地生产潜力<sup>[1, 5]</sup>, 提升这些地区的耕地现实生产能力、提高耕地资源利用效率对应挑战非常重要。研究表明, 通过使用新技术、提升水肥利用效率、采用先进的农业管理手段等方法能够使耕地增产, 大幅度提高粮食供给量<sup>[1, 4-5, 10-11]</sup>, 同时保证环境影响最小化。中国作为世界上最大的粮食生

收稿日期: 2014-07-25; 修订日期: 2014-11-28

**基金项目:** 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-ST5-019); 中国科学院重点部署项目(KSZD-EW-Z-021-02); 国家自然科学基金重点项目(41430861) [Foundation: Science and Technology Service Network Initiative, No.KFJ-EW-ST5-019; The Key Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KSZD-EW-Z-021-02; National Natural Science Foundation of China, No.41430861]

**作者简介:** 冀咏赞(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化与生态系统生产力研究。

E-mail: jiyz.12s@igsnrr.ac.cn

**通讯作者:** 闫慧敏(1974-), 女, 副研究员, 主要从事土地利用变化及其生态环境效应研究。E-mail: yanhm@igsnrr.ac.cn

产国和消费国,其粮食安全问题不仅关系到国家的稳定和发展,而且会对国际粮食供应状况产生影响。中国农业发展的资源约束条件正日益严峻<sup>[10]</sup>,实现农业的持续稳定增长,根本出路在于加快农业科技创新,提高资源利用效率<sup>①</sup>,实现农业高产高效与资源永续利用协调兼顾。

为保护、支持农业发展,改善农业生产基本条件,提高农业综合生产能力和综合效益,自1988年开始进行大面积的以中低产田改造为主的农业综合开发,并于2009年起开始启动高标准农田建设工程。从1988年到2012年,开发范围涉及全国2045个县(市、区、旗)和222个国有农(牧、林)场,累计改造中低产田、建设高标准农田6.61亿亩<sup>②</sup>。

2013年初国务院批复了《国家农业综合开发高标准农田建设规划》,到2020年,全国将改造中低产田、建设高标准农田4亿亩。为了实现这一目标,需要在空间上清晰地掌握全国高中低产田的分布区域。

在现有的研究中,高中低产田的划分方法可归纳为以下三种:一是地力等级法,以耕地实地调研为基础,把耕地障碍因素作为划分耕地地力等级的关键指标,也就是将不存在和基本上不存在限制因素的耕地划归高产田,再根据限制因素的限制程度划分中低产田<sup>[13]</sup>;二是平均产量法<sup>[12-13]</sup>,以粮食平均单产为中值,上下各浮动一定的比重(一般为15%左右)或数值(一般为50 kg),分别作为中产田的上限和下限;三是潜力产出率法<sup>[13]</sup>,根据耕地现实产出水平与其最大生产潜力的比值大小来划分高中低产田。这些方法有其各自的优点,但同时也存在相应的问题,地力等级法需要系统细致的野外调研工作,对各种耕地限制因素进行整合评判和分析,需要大量的人力物力和时间,难以实现耕地质量的快速动态监测与评估,不适用于进行大尺度耕地质量评价;平均产量法依托于农业统计数据中的粮食产量,难以避免农业结构调整和作物品种变化等因素的干扰,同时每年一次的统计数据作为现阶段全国尺度上反映实际农田生产力的重要信息源,其最小空间单元是县,难以对特定地块耕地质量做出评价;潜力产出率法则需要对耕地最大生产潜力进行估算,计算复杂,过程繁琐。因此,使用新的数据与方法实现大尺度耕地质量的及时监测与有效评估对于加强耕地质量建设和合理利用土地具有重要意义。

遥感技术多星种、多传感器、多分辨率共同发展的局面为各个时空尺度下土地利用变化、农作物长势监测等方面的研究提供了数据基础<sup>[14]</sup>,同时生产力模型的发展使其越来越多地被应用于不同尺度不同类型生态系统生产力模拟及生产力对气候和土地利用变化的响应研究<sup>[15-18]</sup>。遥感技术的进步与农田生产力遥感模型的发展为高中低产田新划分方法的建立创造了可能。生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是绿色植被在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量,它直接反映耕地的现实生产能力且为各种作物生产能力提供一个统一的衡量标准。随着NPP遥感估算方法日趋成熟,现已可以作为监测高中低产田的有效且可行的度量指标。VPM模型是基于MODIS数据估算NPP的重要方法之一,较其他同类模型,该模型能够模拟农业多熟种植区的生态系统生产力,与通量观测和农业统计数据的对比研究证明在中国估算农田生态系统生产力的可靠性高于同类模型<sup>[16, 19]</sup>。本研究基于2010年全国耕地成分栅格数据集和空间分辨率500 m、时间分辨率8天的MODIS遥感数据,应用VPM模型结合中国耕作制度区划,探索中国高中低产田遥感监测方法,掌握中国高中低产田的分布规律与特点。

① 陈锡文: 走中国特色农业现代化道路, <http://cpc.people.com.cn/GB/64162/82819/114926/114927/6840448.html> (2008/01/30)

② 王光坤: 农业综合开发战略调向“退减保调转”, [http://www.farmer.com.cn/xwpd/btxw/201312/t20131206\\_920451.htm](http://www.farmer.com.cn/xwpd/btxw/201312/t20131206_920451.htm) (2013/12/06)

## 2 数据与方法

### 2.1 基于MODIS数据的生态系统生产力遥感模型 AGRO-VPM

VPM (Vegetation Photosynthesis Model) 模型<sup>[20]</sup>是一个基于卫星遥感数据进行生态系统生产力估算的光能利用率模型。它首先利用 Monteith 方程的原理对生态系统总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 进行模拟, 进而根据自养呼吸与 GPP 的比例关系计算 NPP。VPM 模型估算 GPP 可以表示为:

$$GPP = \varepsilon g \times FPAR_{chl} \times PAR \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon g$  为光能利用率 ( $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PPFD}$ );  $FPAR_{chl}$  表示被植被光合部分所吸收的光合有效辐射 (PAR) 比例;  $PAR$  表示光合有效辐射 ( $\mu\text{mol photosynthetic photon flux density, PPFD}$ )。

其中, 生态系统的  $\varepsilon g$  由最大光能利用率、温度、水分以及叶片物候期共同决定, 即:

$$\varepsilon g = \varepsilon_0 \times T_{\text{scalar}} \times W_{\text{scalar}} \times P_{\text{scalar}} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为最大光能利用率 ( $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PPFD}$ ), 通过应用  $\text{CO}_2$  涡度通量塔测量的生态系统  $\text{CO}_2$  净交换 (NEE) 和 incident PAR ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s PPFD}$ ) 数据由米氏方程计算求得<sup>[16]</sup>。 $T_{\text{scalar}}$ 、 $W_{\text{scalar}}$  和  $P_{\text{scalar}}$  分别是温度、水分以及叶片物候期对最大光能利用率的调节系数。以上参数的获取及计算方法详见 Kalfas J L<sup>[21]</sup>一文。

根据对小麦、向日葵、高粱、豆类等作物呼吸作用和生长速率全过程实验结果, 作物生长过程中自养呼吸与光合作用生成 GPP 的比例是不变的, 呼吸消耗与 GPP 的比例系数为 0.42<sup>[22-25]</sup>。

AGRO-VPM 模型在农田生态系统中得到了充分的验证, 中国学者将其应用到东北春玉米和退化草地<sup>[26]</sup>以及禹城冬小麦—夏玉米轮作农田生态系统<sup>[19]</sup>中, 均取得较好的模拟效果。

### 2.2 数据

#### (1) 耕地数据

本研究中使用的 2010 年耕地数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所“全国耕地资源遥感监测与耕地保护对策研究”项目组, 该数据是利用 Landsat TM/ETM 进行影像解译, 通过实地调查和精度验证生成 1:10 万矢量图的基础上统计生成。每个栅格对应的值为该栅格内耕地面积所占的万分比, 其分辨率为 1 km。

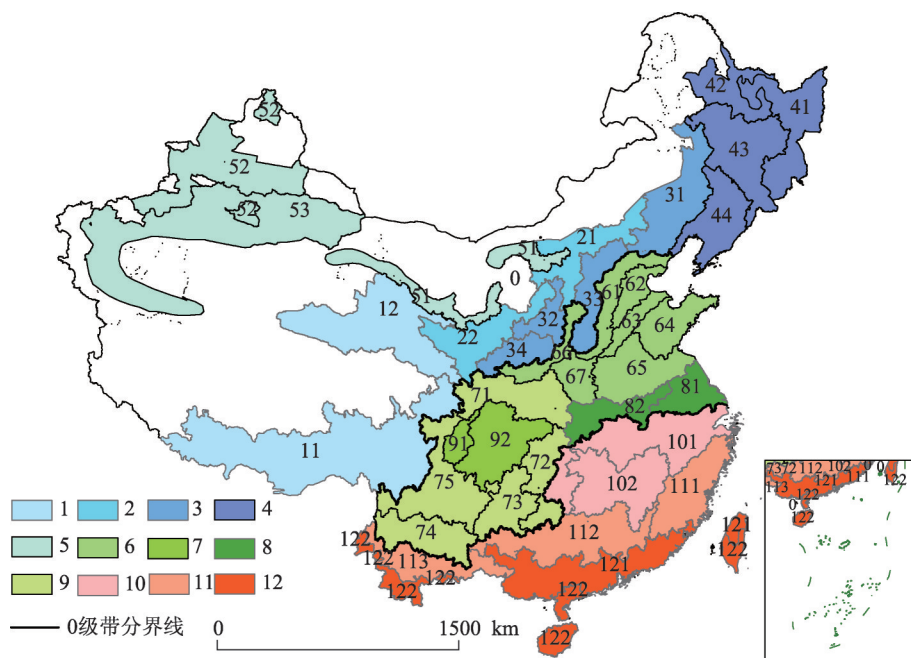
#### (2) 中国耕作制度区划

由于中国自然及气候条件的地域差异性极大, 而依据热量、水分、地貌等环境指标划分的中国耕作制度区划使得每个区域内部具有自然条件和种植制度的相对均一性, 因此利用耕作制度区划对全国进行分区, 进而基于净初级生产力对各个耕作区进行高中低产田划分可以有效地避免全国不同区域因条件差异导致的耕地质量不可比的问题。中国耕作制度区划<sup>[27]</sup>根据热量条件、水分、地貌及社会经济条件、耕作制与熟制特点、作物类型, 将中国耕作制度分成 3 个带, 12 个一级区, 38 个二级区。分区时兼顾了自然条件与社会经济条件, 基本上保持了县级行政单元的完整性 (图 1)。

#### (3) MODIS 数据

VPM 模型的输入数据为增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) 以及地表水分指数 LSWI (Land Surface Water Index), 利用空间分辨率 500 m、时间分辨率 8 天的 MODIS 地表反射率产品 (MOD09A1) (<http://www.edc.usgs.gov/>) 计算可得。

EVI 考虑了土壤背景对植被指数的影响, 对气溶胶等残留做了进一步校正<sup>[28]</sup>。



注: 引自刘巽浩《中国耕作制度》。0级带分界线将全国分为一熟区、二熟区和三熟区, 1-12为12个一级区代码, 在图中用相同颜色标示, 将一级区细分得到38个二级区, 在图中用数字标出。二级区代码对应名称在表1中列出。

图1 中国耕作制度区划图

Fig. 1 The farming system zoning map of China

$$EVI = G \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (C1 \times \rho_{red} - C2 \times \rho_{blue}) + L} \quad (3)$$

式中:  $G = 2.5$ ,  $C1 = 6$ ,  $C2 = 7.5$ ,  $L = 1$ ;  $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 和 $\rho_{blue}$ 分别表示近红外波段、红波段和蓝波段的反射率。

LSWI通过利用短波红外(SWIR)波段对水分含量的敏感性来进行计算。

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (4)$$

式中:  $\rho_{nir}$ 和 $\rho_{swir}$ 分别表示近红外和短波红外波段的反射率。

温度数据由来自国家气象局的中国气象科学数据共享服务网(<http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjgx/>)提供的2000-2008年的气象站点气温数据经ANUspline软件进行样条插值得到, 是与遥感数据时空分辨率(8天, 500 m)匹配的栅格数据; PAR数据为利用MODIS地表反射率产品反演得到的与遥感数据时空分辨率(8天, 500 m)匹配的栅格数据。

## 2.3 高中低产田划分方法

**2.3.1 高中低产田定义** 本研究中, 中低产田是指目前的产出水平远未达到所处的自然和社会经济条件下应有的生产能力, 具有较大增产潜力的耕地; 高产田是指不存在或较少存在制约农业生产的限制因素, 生产能力较高的耕地。

**2.3.2 VPM模型模拟** 利用VPM模型模拟2000-2008年全国耕地净初级生产力, 为了消除气候波动以及农业管理措施变化等因素的影响, 计算9年NPP的均值作为高中低产田划分的数据基础。

耕地净初级生产力大体呈现出从西北向东南逐渐增加的趋势, 这与中国水热条件的



变化相一致。南方三熟区耕地分布虽不集中,但产能最高;黄淮海地区耕地分布广泛且连续,大部分耕地产能较高;四川盆地和东北部分地区产能次之。值得注意的是新疆西北部 and 西部有少量耕地产能很高。宁夏和甘肃中部、陕西北部为全国耕地产能较低区域。

**2.3.3 高中低产田产能区间界定** 在确定高中低产田标准过程中,为了降低遥感信息中混合像元对划分结果的影响,首先提取耕地面积比例大于等于50%的栅格所对应的净初级生产力用于划分标准的制定,获取各个耕作区内NPP值的频率分布直方图。

耕作区存在四种典型的频率分布直方图(图2),每种均包含一个主要的正态分布,该正态分布前后存在一定的噪声。由于噪声的存在会影响每个耕作区内高中低产田划分标准的确定,因此将正态分布前后两个拐点对应的NPP值作为分界值,落在正态分布分界值以内的栅格则为有效栅格。定义分界值为 $NPP_a$ 和 $NPP_b$  ( $NPP_a < NPP_b$ ),定义 $NPP_{dif}$ 为 $NPP_b$ 与 $NPP_a$ 的差值。

对耕地进行高中低产田划分的依据实质上是按照平均分配原则将耕地分为三类,低产田上限标准为 $NPP_a + 1/3 \times NPP_{dif}$ ,高产田下限标准为 $NPP_b - 1/3 \times NPP_{dif}$ 。但是,考虑到随着中低产田改造的实施,低产田面积比例减少,中高产田面积比例增加,因此将低、中、高产田所占比例进行适当调整,调整后的占比分别为30%、35%和35%。即高中低产田标准的划分界限为:

低产田上限标准=  $NPP_a + NPP_{dif} \times 30\%$

高产田下限标准=  $NPP_b - NPP_{dif} \times 35\%$

以此为标准对各个耕作区内所有耕地进行高中低产田划分。各耕作区内有效栅格NPP范围及高中低产田划分标准见表1。

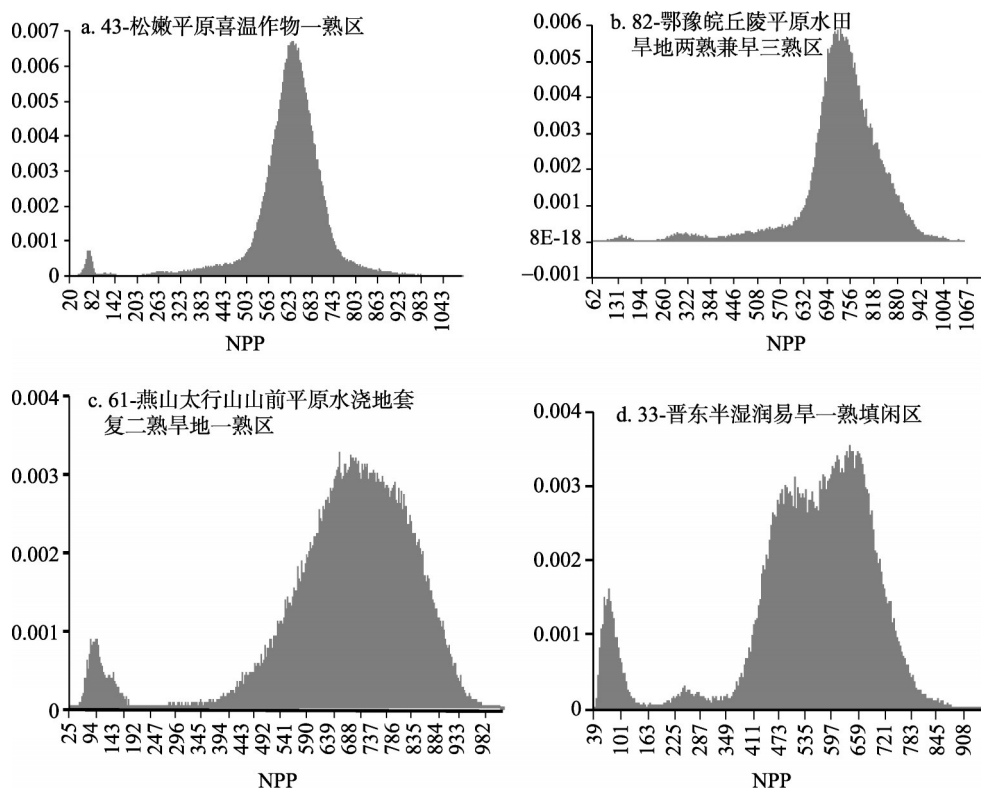


图2 四种典型的频率分布直方图示例

Fig. 2 Histograms of typical frequency distribution

表1 耕作区有效栅格NPP范围及高中低产田划分标准(gC/m<sup>2</sup>/a)Tab. 1 NPP range of effective grids in each farming area and criteria for the classification of high, medium and low yield cropland (gC/m<sup>2</sup>/a)

| 序号 | 二级区代码及名称                 | $NPP_a$ | $NPP_b$ | $NPP_{dif}$ | 低产田<br>上限 | 高产田<br>下限 | 提升<br>潜力 |
|----|--------------------------|---------|---------|-------------|-----------|-----------|----------|
| 1  | 11-藏东南川西谷地喜凉作物一熟区        | 192     | 800     | 608         | 374       | 587       | 213      |
| 2  | 12-海北甘南高原喜凉作物一熟轮歇区       | 275     | 750     | 475         | 418       | 584       | 166      |
| 3  | 21-后山坝上晋北高原山地半干旱喜凉作物一熟区  | 370     | 700     | 330         | 469       | 585       | 116      |
| 4  | 22-陇中青东宁中南黄土丘陵半干旱喜凉作物一熟区 | 250     | 800     | 550         | 415       | 608       | 193      |
| 5  | 31-辽吉西蒙东南冀北半干旱喜温一熟区      | 430     | 850     | 420         | 556       | 703       | 147      |
| 6  | 32-黄土高原东部易旱喜温一熟区         | 380     | 650     | 270         | 461       | 556       | 95       |
| 7  | 33-晋东半湿润易旱一熟填闲区          | 380     | 800     | 420         | 506       | 653       | 147      |
| 8  | 34-渭北陇东半湿润易旱冬麦一熟填闲区      | 437     | 900     | 463         | 576       | 738       | 162      |
| 9  | 41-大小兴安岭山麓岗地凉温作物一熟区      | 500     | 820     | 320         | 596       | 708       | 112      |
| 10 | 42-三江平原长白山地温凉作物一熟区       | 500     | 850     | 350         | 605       | 728       | 123      |
| 11 | 43-松嫩平原喜温作物一熟区           | 500     | 780     | 280         | 584       | 682       | 98       |
| 12 | 44-辽河平原丘陵温暖作物一熟填闲区       | 510     | 783     | 273         | 592       | 687       | 96       |
| 13 | 51-河套、河西灌溉一熟填闲区          | 300     | 1000    | 700         | 510       | 755       | 245      |
| 14 | 52-北疆灌溉一熟填闲区             | 450     | 1200    | 750         | 675       | 938       | 263      |
| 15 | 53-南疆、东疆绿洲二熟一熟区          | 400     | 1100    | 700         | 610       | 855       | 245      |
| 16 | 61-燕山太行山山前平原水浇地套复二熟旱地一熟区 | 430     | 950     | 520         | 586       | 768       | 182      |
| 17 | 62-黑龙江缺水低平原水浇二熟旱地一熟区     | 450     | 875     | 425         | 578       | 726       | 149      |
| 18 | 63-鲁西北豫北低平原水浇地粮二熟棉一熟区    | 550     | 970     | 420         | 676       | 823       | 147      |
| 19 | 64-山东丘陵水浇地二熟旱坡地花生棉花一熟区   | 450     | 900     | 450         | 585       | 743       | 158      |
| 20 | 65-黄淮平原南阳盆地旱地水浇地两熟区      | 600     | 1000    | 400         | 720       | 860       | 140      |
| 21 | 66-汾渭谷地水浇地二熟旱地一熟二熟区      | 400     | 900     | 500         | 550       | 725       | 175      |
| 22 | 67-豫西丘陵山地旱坡地一熟水浇地二熟区     | 550     | 850     | 300         | 640       | 745       | 105      |
| 23 | 71-秦巴山区旱地二熟一熟兼水田二熟区      | 650     | 1100    | 450         | 785       | 943       | 158      |
| 24 | 72-川鄂湘黔低高原山地水田旱地二熟兼一熟区   | 550     | 900     | 350         | 655       | 778       | 123      |
| 25 | 73-贵州高原水田旱地二熟一熟区         | 520     | 820     | 300         | 610       | 715       | 105      |
| 26 | 74-云南高原水田旱地二熟一熟区         | 500     | 1300    | 800         | 740       | 1020      | 280      |
| 27 | 75-滇黔边境高原山地河谷旱地一熟二熟水田二熟区 | 500     | 1000    | 500         | 650       | 825       | 175      |
| 28 | 81-江淮平原麦稻两熟兼旱三熟区         | 450     | 1000    | 550         | 615       | 808       | 193      |
| 29 | 82-鄂豫皖丘陵平原水田旱地两熟兼旱三熟区    | 600     | 950     | 350         | 705       | 828       | 123      |
| 30 | 91-盆西平原水田麦稻两熟填闲区         | 550     | 820     | 270         | 631       | 726       | 95       |
| 31 | 92-盆东丘陵低山水田旱地两熟三熟区       | 570     | 930     | 360         | 678       | 804       | 126      |
| 32 | 101-沿江平原丘陵水田旱三熟二熟区       | 400     | 1000    | 600         | 580       | 790       | 210      |
| 33 | 102-两湖平原丘陵水田中三熟二熟区       | 600     | 1000    | 400         | 720       | 860       | 140      |
| 34 | 111-浙闽丘陵山地水田旱地三熟二熟区      | 500     | 1250    | 750         | 725       | 988       | 263      |
| 35 | 112-南岭丘陵山地水田旱地三熟二熟区      | 600     | 1000    | 400         | 720       | 860       | 140      |
| 36 | 113-滇南山地旱地水田二熟兼三熟区       | 600     | 1400    | 800         | 840       | 1120      | 280      |
| 37 | 121-华南低平原晚三熟区            | 450     | 1200    | 750         | 675       | 938       | 263      |
| 38 | 122-华南沿海西双版纳台南二熟三熟与热作区   | 550     | 1500    | 950         | 835       | 1168      | 333      |

### 3 结果与分析

高中低产田的划分标准体现了由耕地自然生产潜力所决定的耕地产能的区域差异,低产田上限和高产田下限总体上的规律为三熟区最高、二熟区居中、一熟区最低(图3)。水热充沛地区的低产田实际产能会高于干旱寒冷区的高产田产能,在38个二级耕作区中,低产田上限最高的耕作区为滇南山地旱地水田二熟兼三熟区(113),其上限标准达840 gC/m<sup>2</sup>/a,高于27个二级耕作区的高产田下限标准。

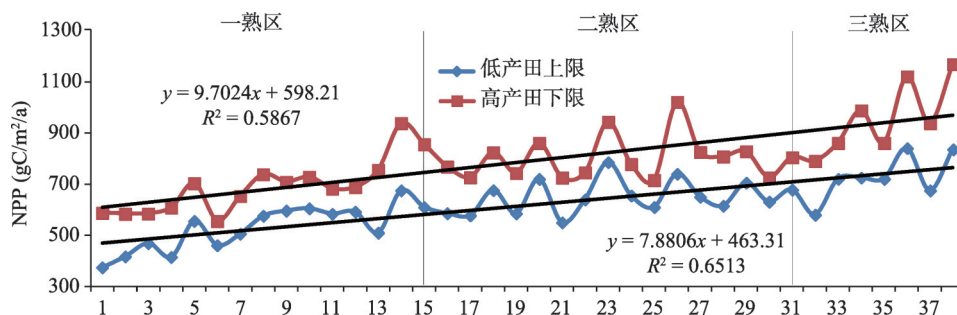


图3 高中低产田划分标准变化趋势(横轴对应表1中38个二级区序号)

Fig. 3 Change trends of criteria for the classification of high, medium and low yield cropland (The horizontal axis digital corresponds to the sequence number of Tab.1)

高产田下限与低产田上限的差值意味着各耕作区内低产田改造的提升潜力,为了掌握各个区域的产能提升潜力,根据高产田下限与低产田上限的差值将各耕作区划分为<100, 100~150, 150~250和>250四类产能提升类型区。其中黄土高原东部易旱喜温一熟区(32)、辽河平原丘陵温暖作物一熟填闲区(44)、盆西平原水田麦稻两熟填闲区(91)和松嫩平原喜温作物一熟区(43)四个耕作区提升潜力最低;北疆灌溉一熟填闲区(52)、浙闽丘陵山地水田旱地三熟二熟区(111)、华南低平原晚三熟区(121)、云南高原水田旱地二熟一熟区(74)、滇南山地旱地水田二熟兼三熟区(113)和华南沿海西双版纳台南二熟三熟与热作区(122)六个耕作区提升潜力最高(表1)。

中国高、中、低产田面积分别占全国耕地面积的20.66%、39.56%以及39.78%。高产田主要分布在华北平原、长江中下游平原、四川盆地、吉林省中部以及辽宁省东北部,这些区域地势平坦,水资源充沛,为农作物生长提供了良好的条件;高产田在陕西中部、宁夏北部、甘肃中部及南部、新疆西北部地区也有少量分布,这些地区气候条件相对较差,但河流的流经为水资源的供给、农业的发展提供了保障,使其相较同一耕作区内其他耕地生产力更高。中产田集中分布于东北平原、四川盆地、河南省南部、安徽省中北部,这些地区多位于高产田分布区附近,水土条件也比较适宜发展农业,中产田在湖南、江西、广东、广西等地区也有零散分布。低产田则多分布于黄土高原、黄河入海口处、云贵高原等自然和气候条件较恶劣地区(图4)。

除热量、水分等已体现在中国耕作制度区划中的因素之外,地形条件也是导致耕地生产力区域差异的因素之一。地形起伏度是较好的区域尺度地形指标,能够反映地表的起伏变化,用地面一定距离范围内最大的高程差表示<sup>[29]</sup>。本研究基于1 km的数字高程模型,以5 km×5 km为适宜尺度分析窗口<sup>[30]</sup>,提取中国区域地形起伏度,将小于30 m的地区定义为平原,大于30 m的地区定义为丘陵山地<sup>[29]</sup>。平原区耕地约占全国耕地面积的40%,丘陵山地区耕地约占全国耕地面积的60%。平原区中中产田占比最高,为48.14%,其次为高产田,占27.95%,低产田仅占平原区耕地的23.91%;丘陵山地区中低

产田面积最大, 占比为49.15%, 其次为中产田, 占34.61%, 高产田仅占丘陵山地区的16.24% (图5a)。

在平原区, 中、高产田的比例皆高于全国平均水平, 低产田比例则远远低于全国平均水平, 而在丘陵山地区, 低产田占比接近50%, 高于全国平均值39.78%, 中、高产田比例则低于全国平均状况。就三类农田的地形组成结构来看, 约3/4的低产田分布于丘陵山地

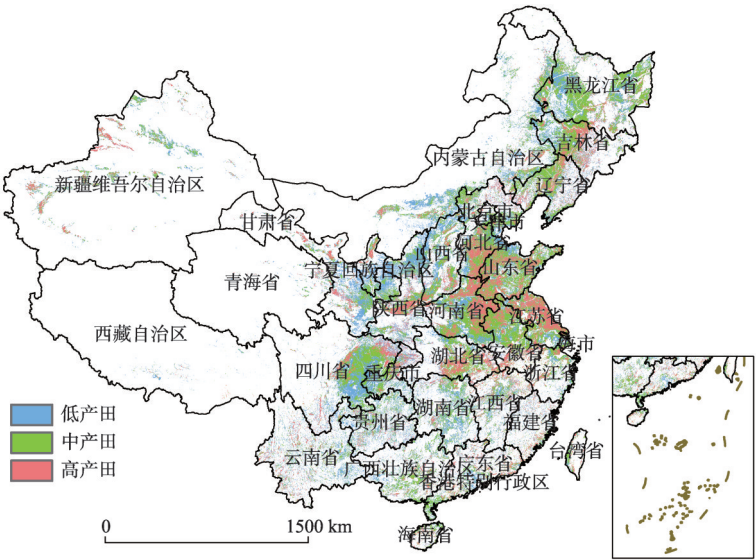


图4 全国高中低产田分布图

Fig. 4 The distribution map of high, medium and low yield cropland in China

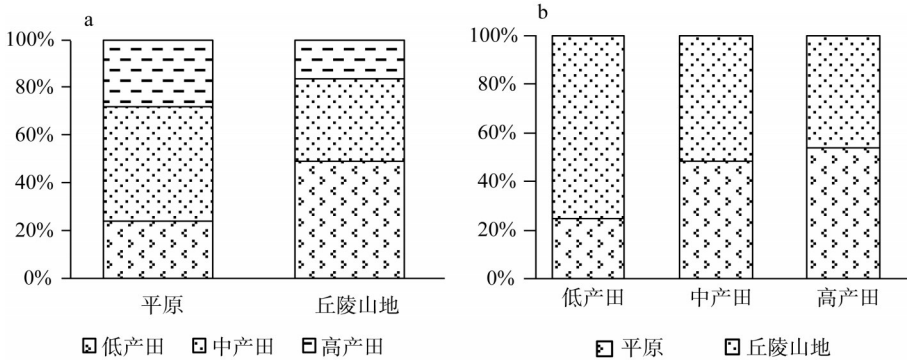


图5 不同地形区以及不同等级耕地的组成结构

Fig. 5 The composition structure of different terrain areas and croplands

区, 中产田在平原区和丘陵山地区的分布大致相当, 而高产田中约有53%分布于平原区, 47%位于丘陵山地区 (图5b)。

高产田面积排名全国前五的省份分别为河南省、山东省、江苏省、河北省和安徽省, 均位于黄淮海区域内, 其次为湖北省、吉林省和四川省。高产田在这8个省份内集中连片分布, 占全国高产田面积的57.3%。中低产田在黑龙江省、四川省、内蒙古自治区、河南省和河北省分布较多, 占全国中低产田面积的34.88%。河南省、河北省和山东省耕地面积大, 高产田和中低产田均有广泛分布 (表2)。

全国共有12个省 (自治区) 内高产田比例高于全国平均水平, 江苏省更是以接近50%的高产田比例位居全国首位, 同时省内低产田比例不足15%, 其次分别为河南省、山东省、湖北省、安徽省、河北省、吉林省、新疆维吾尔自治区、台湾省、辽宁省、海南省以及广东省, 省/自治区内高产田分别占34.69%、32.86%、31.73%、28.80%、27.82%、26.40%、25.18%、23.47%、22.96%、21.17%和20.78%。低产田比例高于全国平均水平的有17个省 (直辖市、自治区), 其中西藏自治区低产田比例全国最高



表2 各省高中低产田面积(万 km<sup>2</sup>)

Tab. 2 The areas of high, medium and low yield cropland in every province (ten thousand km<sup>2</sup>)

| 行政区  | 高产田面积 | 中产田面积 | 低产田面积 | 行政区 | 高产田面积 | 中产田面积 | 低产田面积 |
|------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| 河南省  | 3.72  | 4.47  | 2.54  | 江西省 | 0.89  | 1.33  | 2.18  |
| 山东省  | 3.35  | 4.95  | 1.90  | 甘肃省 | 0.87  | 1.77  | 3.90  |
| 江苏省  | 3.25  | 2.51  | 1.00  | 广西  | 0.57  | 2.04  | 2.51  |
| 河北省  | 2.68  | 4.26  | 2.71  | 浙江省 | 0.56  | 1.16  | 1.04  |
| 安徽省  | 2.28  | 4.33  | 1.30  | 重庆市 | 0.55  | 1.32  | 1.97  |
| 湖北省  | 2.12  | 2.52  | 2.04  | 湖南省 | 0.50  | 2.00  | 3.51  |
| 吉林省  | 1.96  | 3.15  | 2.32  | 福建省 | 0.44  | 0.50  | 1.24  |
| 四川省  | 1.61  | 5.11  | 5.31  | 贵州省 | 0.42  | 1.25  | 3.30  |
| 新疆   | 1.48  | 2.09  | 2.30  | 宁夏  | 0.27  | 0.51  | 1.04  |
| 陕西省  | 1.48  | 1.89  | 3.79  | 海南省 | 0.18  | 0.44  | 0.25  |
| 辽宁省  | 1.46  | 2.94  | 1.96  | 青海省 | 0.16  | 0.22  | 0.43  |
| 黑龙江省 | 1.41  | 8.78  | 5.61  | 台湾省 | 0.15  | 0.31  | 0.18  |
| 云南省  | 1.07  | 1.61  | 4.17  | 上海市 | 0.07  | 0.25  | 0.12  |
| 内蒙古  | 1.03  | 4.06  | 6.16  | 西藏  | 0.06  | 0.07  | 0.33  |
| 山西省  | 0.99  | 2.16  | 2.95  | 天津市 | 0.06  | 0.35  | 0.27  |
| 广东省  | 0.90  | 1.50  | 1.94  | 北京市 | 0.05  | 0.23  | 0.20  |

(71.8%)，而高、中产田各只占不足15%，其次分别为贵州省、云南省、甘肃省、湖南省、福建省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、青海省、重庆市、江西省、广西壮族自治区、山西省、广东省、四川省和北京市，省/市/自治区内低产田分别占66.48%、60.85%、59.64%、58.37%、56.98%、56.95%、54.76%、52.99%、52.57%、51.29%、49.47%、49.00%、48.41%、44.70%、44.13%和41.20%（图6）。

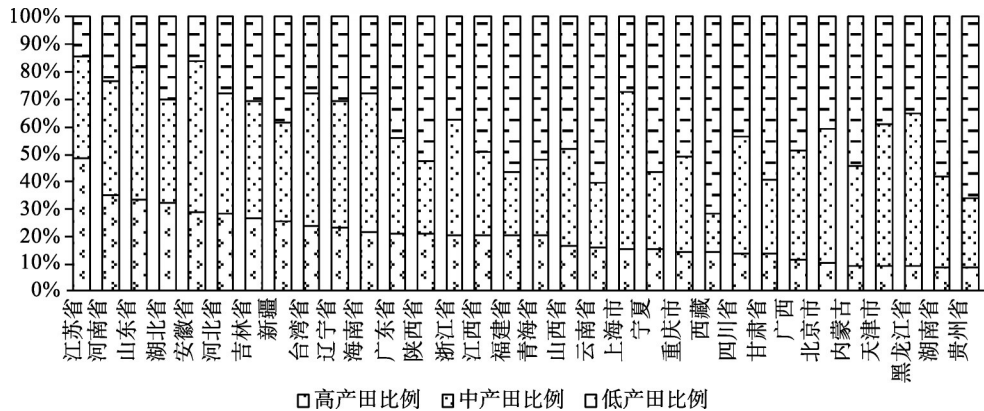


图6 各省高中低产田所占耕地比例

Fig. 6 The proportions of high, medium and low yield cropland in each province

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究基于农田生产力遥感模型划分的高中低产田分别占全国耕地面积的20.66%、39.56%以及39.78%。约3/4的低产田分布于丘陵山地区，丘陵山地区的高产田主要分布在吉林中东部、甘肃中部及南部、新疆西北部、四川及重庆东北部、湖北东部等地区；

而平原区仍有近一半(48.14%)的耕地为中产田, 高产田仅占27.95%, 平原区的低产田主要分布在黄河入海口处、湖南和江西中北部以及黑龙江和吉林的东部等地区。

位于黄淮海粮食主产区的江苏省、河南省、山东省、安徽省和河北省高产田面积总和占全国高产田面积的41.75%, 位于长江中下游平原的湖北省高产田面积占全国高产田面积的5.78%, 位于东北平原的吉林省高产田面积占全国高产田面积的5.36%。

中低产田面积占全省耕地总面积比例高于85%的省份有贵州省、湖南省、黑龙江省、天津市、内蒙古自治区、北京市、广西壮族自治区、甘肃省、四川省、西藏自治区和重庆市; 低产田面积比例最高的三个省份为西藏自治区、贵州省和云南省, 低产田面积占全省耕地总面积的60%以上。耕地面积位列全国前三的黑龙江省、四川省和内蒙古自治区(表2), 其高产田面积占比均不足15%, 中产田面积分别为8.78万 $\text{km}^2$ 、5.11万 $\text{km}^2$ 和4.06万 $\text{km}^2$ , 占全省耕地总面积的55.57%、42.46%和36.08%; 低产田面积分别为5.61万 $\text{km}^2$ 、5.31万 $\text{km}^2$ 和6.16万 $\text{km}^2$ , 占全省耕地总面积的35.48%、44.13%和54.76%。黑龙江省和内蒙古自治区的中低产田中分别有61.77%和26.33%分布于平原区, 四川省的中低产田中有88.01%分布于丘陵山地区。

## 4.2 讨论

在已有的高中低产田划分研究中, 《我国中低产田分布及粮食增产潜力研究》(1988)采用地力等级法将耕地分为七个等级, 之后按照等级进行高中低产田划分, 得到高产田占全国耕地比例为32.16%, 中产田占32.90%, 低产田占34.94%<sup>[13]</sup>; 《中国耕地资源及其开发利用》(1992)采用平均产量法划分的高中低产田分别占比21.54%、37.24%和41.22%<sup>[13, 31]</sup>; 潜力产出率法划分的高中低产田分别占比34.92%、41.95%和23.14%<sup>[13]</sup>。本研究中的高中低产田所占比例与《中国耕地资源及其开发利用》中的结果较为相近, 但与另外两种划分结果相比本研究高产田所占比例低于另外两种方法。比较发现, 《中国耕地资源及其开发利用》和本文的划分方法相对更为保守, 在全国东北区(黑吉辽)、华北区(京津冀鲁豫)、黄土高原区(晋陕甘)、西北干旱区(新蒙宁)、青藏高原区(青藏)、长江中下游区(苏皖鄂湘赣浙沪)、华南区(粤桂闽琼台)和西南区(川滇渝黔)等八大区中, 三个区的耕地以中产田为主, 五个区的耕地以低产田为主, 而潜力产出率法的划分结果中有两个区的耕地以高产田为主, 四个区的耕地以中产田为主, 仅有两个区的耕地以低产田为主。划分结果出现差异的一个原因是每一种划分方法均无法避免人为主观因素的干扰, 但这是中低产田划分方法共有的不足之处, 也是导致本方法划分结果不确定性的原因之一。已有方法多以县为最小调查单元, 高中低产田在栅格级别上的空间分布格局不明确, 但是就高中低产田在全国八大区的分布情况来看, 各个方法的划分结果均能够反映区域尺度的耕地质量状况: 高产田所占比例高于全国平均水平的区域为水热条件较好的华北区和长江中下游区, 低产田所占比例远高于全国平均水平的区域为不太适宜发展农业的黄土高原区和西北干旱区。

农业的不断发展带来了诸多环境问题, 城市化进程的加快导致农业生产资源受限, 因此提高资源利用效率是实现农业持续稳定增长、保障国家粮食安全的必由之路。在空间上清晰地识别全国高中低产田的分布区域是进行农业综合开发中低产田改造的前提。遥感技术的不断进步和生态系统生产力遥感模型的日益成熟为基于净初级生产力划分高中低产田创造了条件。基于遥感的生态系统生产力模型能够清晰表达耕地NPP的空间格局, 很好地解决了利用统计数据进行高中低产田划分时以县为统计单元导致的县内高中低产田格局不明确的问题。同时, 遥感信息综合反映了自然条件和管理因素对农作物生长的影响。耕作制度区划的引入使高中低产田的划分基于耕地所在耕作区的自然和社会

条件, 因此耕地质量并非由耕地净初级生产力值在全国范围内的高低决定, 而是由其在相应耕作区内的高低决定。这样可以使得划分入某一类的耕地虽然生产力高低不同, 但均能反映其在当前的气候和自然条件下是否需要改造及改造后增产潜力的高低。目前, 黄土高原东部易旱喜温一熟区 (32)、辽河平原丘陵温暖作物一熟填闲区 (44)、盆地西平原水田麦稻两熟填闲区 (91) 和松嫩平原喜温作物一熟区 (43) 四个耕作区的低产田提升潜力最低, 小于  $100 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ; 北疆灌溉一熟填闲区 (52)、浙闽丘陵山地水田旱地三熟二熟区 (111)、华南低平原晚三熟区 (121)、云南高原水田旱地二熟一熟区 (74)、滇南山地旱地水田二熟兼三熟区 (113) 和华南沿海西双版纳台南二熟三熟与热作区 (122) 六个耕作区的低产田提升潜力最高, 大于  $250 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ , 其余 28 个耕作区的低产田提升潜力均在  $100\sim 250 \text{ gC/m}^2/\text{a}$  之间。

本研究应用空间分辨率  $500 \text{ m}$  的 MODIS 数据估算耕地生产力, 为了消除混合像元对高中低产田划分标准的影响, 在确定各个耕作区的划分标准时使用了耕地占栅格面积大于等于 50% 的栅格对应的 *NPP* 数据, 使得农田为栅格内主要的土地利用方式, 但对于耕地所占面积比例低的栅格, 该方法并不能降低混合像元影响产生的结果不确定性。因此, 更为精细的区域中低产田改造规划需要更高分辨率的生产力数据的支持。此外, 耕地产能的稳定程度体现了耕地在外界条件 (主要是气候因素) 突变的情况下保持其原有生产力的能力, 不断提高高产稳产耕地的数量是实现粮食供给持续增长、保障国家粮食安全的有效途径。随着高标准农田建设步伐的推进, 如何有效检测高标准农田的分布将是支撑未来现代农业开发规划亟待解决的技术之一。

## 参考文献(References)

- [1] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor> (accessed, March 2011).
- [3] Ramankutty N, Evan A T, Monfreda C, et al. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(1).
- [4] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [5] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [6] Seufert V, Ramankutty N, Foley J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 2012, 485(7397): 229-232.
- [7] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [8] Robertson G P, Swinton S M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: A grand challenge for agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(1): 38-46.
- [9] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T, et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28(1): 315-358.
- [10] Shi Quanhong, Wang Hong, Chen Fu, et al. The spatial-temporal distribution characteristics and yield potential of medium-low yielded farmland in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(19): 369-373. [石全红, 王宏, 陈阜等. 中国中低产田时空分布特征及增产潜力分析. *中国农学通报*, 2010, 26(19): 369-373.]
- [11] Zhang Lin, Zhang Fengrong, Jiang Guanghui, et al. Potential improvement of medium-low yielded farmland and guarantee of food safety in China. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(1): 22-25. [张琳, 张凤荣, 姜广辉等. 我国中低产田改造的粮食增产潜力与食物安全保障. *农业现代化研究*, 2005, 26(1): 22-25.]
- [12] Wu Bingfang, Du Xin, Meng Jihua, et al. A remote sensing method to classify high, medium and low yield cropland and its application in Huang-Huai-Hai Basin//Modern Agricultural Development and National Food Security & Huang-Huai-Hai Modern Agricultural Development Strategy Forum Proceedings, 2009: 104-108. [吴炳方, 杜鑫, 蒙继华, 等. 高中低产田遥感监测方法及在黄淮海流域的应用//现代农业发展与国家粮食安全暨黄淮海现代农业发展战略高峰论坛

论文集, 2009: 104-108.]

- [13] Lin Pengsheng. Study on the distribution and possible production increment of medium and low-yield farmland in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. [林鹏生. 我国中低产田分布及增产潜力研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.]
- [14] Li Folin, Li Benxun, Cao Weixing. Status and prospect of crop-yield assess by remote sensing. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 20(5): 680-684. [李佛琳, 李本逊, 曹卫星. 作物遥感估产的现状及其展望. 云南农业大学学报, 2005, 20(5): 680-684.]
- [15] Liu Wenchao, Yan Changzhen, Qin Yuanwei, et al. Cropland dynamics and its influence on the productivity in recent 20 years in northern Shaanxi, China. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1373-1382. [刘文超, 颜长珍, 秦元伟 等. 近20a陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1373-1382.]
- [16] Yan Huimin, Liu Jiuyan, Huang Heqing, et al. Impacts of cropland transformation on agricultural production under urbanization and Grain for Green Project in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 579-588. [闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响. 地理学报, 2012, 67(5): 579-588.]
- [17] Huang Mei, Ji Jinjun, Peng Lili. The response of vegetation net primary productivity to climate change during 1981-2000 in the Tibetan Plateau. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(5): 608-616. [黄玫, 季劲钧, 彭莉莉. 青藏高原1981-2000年植被净初级生产力对气候变化的响应. 气候与环境研究, 2008, 13(5): 608-616.]
- [18] Wang Yuan, Huang Mei, Wang Xiangrong. Impacts of land use and climate change on agricultural productivity in Shanghai. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(3): 641-648. [王原, 黄玫, 王祥荣. 气候和土地利用变化对上海市农田生态系统净初级生产力的影响. 环境科学学报, 2010, 30(3): 641-648.]
- [19] Yan H M, Fu Y L, Xiao X M et al. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO<sub>2</sub> eddy flux tower data. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 391-400.
- [20] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 519-534.
- [21] Kalfas J L, Xiao X, Vanegas D X, et al. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO<sub>2</sub> flux tower data. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1514-1528.
- [22] Gifford R M. Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling. Global Change Biology, 1995, 1(6): 385-396.
- [23] Luo Y, Sims D A, Thomas R B, et al. Sensitivity of leaf photosynthesis to CO<sub>2</sub> concentration is an invariant function for C<sub>3</sub> plants: A test with experimental data and global applications. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 209-222.
- [24] Cheng W, Sims D A, Luo Y, et al. Photosynthesis, respiration, and net primary production of sunflower stands in ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. Global Change Biology, 2000, 6(8): 931-941.
- [25] Albrizio R, Steduto P. Photosynthesis, respiration and conservative carbon use efficiency of four field grown crops. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 116(1): 19-36.
- [26] Wang Z, Xiao X, Yan X. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China. Agric. For. Meteorol., 2010, 150(9): 1160-1167.
- [27] Liu Xunhao. Chinese Cropping System. Beijing: Agriculture Press, 1993: 12-15. [刘巽浩. 中国耕作制度. 北京: 农业出版社, 1993: 12-15.]
- [28] Li Wenmei, Qin Zhihao, Li Wenjuan, et al. Comparison and analysis of MODIS NDVI and MODIS EVI. Remote Sensing Information, 2010, (6): 73-78. [李文梅, 覃志豪, 李文娟, 等. MODIS NDVI与MODIS EVI的比较分析. 遥感信息, 2010, (6): 73-78.]
- [29] Liu Xinhua, Yang Qinke, Tang Guoan. 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.]
- [30] Zhang Wei, Li Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(4): 8-12. [张伟, 李爱农. 基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4): 8-12.]
- [31] Agricultural Natural Resources and Agricultural Regional Planning Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Soil and Fertilizer Station. Chinese Arable Land Resources and its Exploitation. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992: 15. [中国农业科学院农业自然资源和农业区划研究所, 农业部全国土壤肥料总站. 中国耕地资源及其开发利用. 北京: 测绘出版社, 1992: 15.]



## A MODIS data derived spatial distribution of high-, medium- and low-yield cropland in China

JI Yongzan<sup>1,2</sup>, YAN Huimin<sup>1</sup>, LIU Jiyan<sup>1</sup>, KUANG Wenhui<sup>1</sup>, HU Yunfeng<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the population increase and food consumption upgrade in China, the issue of food self-sufficiency attracts much attention from both Chinese government and international society. Under the circumstances of inadequate cropland resources supply and plenty of cropland occupied by urban construction, improving the utilization efficiency of arable land resources and increasing the cropland productivity have become the fundamental strategies of agricultural development in China. Since 1988, cropland improvement projects (medium-yield and low-yield field improvement and high-standard cropland construction) have been launched and implemented on a large scale, therefore a spatially explicit map for the distribution of high-, medium- and low-yield cropland was essential for cropland improvement planning. In this study, a new method for recognizing high-, medium- and low-yield field is developed based on cropland productivity, which is calculated by using a light use efficiency model and MODIS data with a 500- m resolution. This method can not only reflect the regional heterogeneity of cropland condition, but also express the spatial differences on a grid scale. At the same time, it effectively overcomes the shortage of statistical data based method in a county unit. The results show that the proportion of high-yield, medium-yield and low-yield cropland in China is 20.66%, 39.56% and 39.78%, respectively. About 3/4 of low-yield cropland is located in the hilly and mountainous regions, while 53% of the high-yield cropland is located in plain area. The five provinces with the largest area of high- yield cropland are Henan, Shandong, Jiangsu, Hebei and Anhui, which are all located in the Huang-Huai-Hai region. The sum of the high-yield cropland area in these five provinces accounts for 41.75% of the national total high-yield cropland area. In Heilongjiang province, Sichuan province and Inner Mongolia autonomous region, where the cropland area ranks the top three of China, the proportion of high-yield cropland area in each province only accounts for not more than 15%.

**Keywords:** food security; light use efficiency model; cropland productivity; high- yield, medium-yield and low-yield cropland