

DOI: 10.5846/stxb201411252346

王轶虹, 王美艳, 史学正, 陈龙, 赵永存, 于东升. 2010 年中国农作物净初级生产力及其空间分布格局. 生态学报, 2016, 36(19): 6318-6327.

Wang Y H, Wang M Y, Shi X Z, Chen L, Zhao Y C, Yu D S. Spatial patterns of net primary productivity of crops in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6318-6327.

2010 年中国农作物净初级生产力及其空间分布格局

王轶虹^{1,2}, 王美艳^{1,2}, 史学正^{1,*}, 陈 龙^{1,2}, 赵永存^{1,2}, 于东升^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 采用 2011—2012 年全国实测水稻、小麦、玉米、大豆、油菜、棉花 6 种作物的生物量获得的干燥系数 (*DC*)、收获指数 (*HI*) 和根冠比 (*R/S*), 结合 2010 年以县为单位的农业统计数据估算了 2010 年中国农作物产生的净初级生产力 (*NPP*)。2010 年中国农作物产生的 *NPP* 为 596 Tg C, 其中地上 *NPP* 为 517 Tg C, 地下 *NPP* 为 80 Tg C。 *NPP* 空间分布不平衡, 主要集中在东北的松嫩三江平原、黄淮海平原、长江中下游平原、西南的四川盆地和华南的珠江流域。单位面积农作物产生的 *NPP* 介于 9—2094 g C m⁻² a⁻¹ 之间, 平均密度为 519 g C m⁻² a⁻¹。 *NPP* 密度 (*NPPD*) 较高的地区主要分布在中国的东部的湿润、半湿润地区以及内陆灌溉条件较好的地区。9 个农业区中, 黄淮海区农作物产生的 *NPP* 最多, 东北区 *NPPD* 最高, 青藏区农作物 *NPPD* 最低, 产生的 *NPP* 也最少。作物种植面积能解释 98% 农业区之间 *NPP* 差异。通过对每个区域内县域 *NPPD* 与气候因子和化肥因子做相关分析, 发现化肥施用量、日照时数、气温和降水均对 *NPPD* 的空间分异有影响, 但是 9 个区域的主导因素不同。

关键词: 农作物; Net primary productivity (*NPP*); *NPPD*; 收获指数; 根冠比; 空间变化

Spatial patterns of net primary productivity of crops in China

WANG Yihong^{1,2}, WANG Meiyuan^{1,2}, SHI Xuezheng^{1,*}, CHEN Long^{1,2}, ZHAO Yongcun^{1,2}, YU Dongsheng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

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

Abstract: Net primary productivity (*NPP*) and its response to global change is an important factor to consider in research in this field. A significant pool of carbon (C) is stored in agriculture soils. Crop biomass returned to the soil supports the maintenance of soil organic carbon (SOC). Studying the *NPP*, and its spatial variation aids SOC balance definition and help elucidating soil carbon dynamics in agroecosystems. In this study, we established a new data bank of dry coefficient (*DC*), harvest index (*HI*), and root to shoot ratio (*R/S*) for rice, wheat, corn grain, soybean, cotton, and oilseed crops based on field samples collected across China from 2011 to 2012. The data bank represents the most recent reference coefficients available in China. Using county-level crop yield information, reported as national agricultural statistics, combined with the *DC*, *HI*, and *R/S* for rice, wheat, corn grain, soybean, cotton, and oilseed crops, we estimated the amount of *NPP* produced in 2010, and analyzed its spatial distribution. It was estimated that 596 Tg C was produced in 2010 in China's cropland, mainly distributed in the Huanghuaihai region, the Middle-Lower reaches of Yangtze River and Northeast China. The mean county-level *NPP* density was 519 g C m⁻² a⁻¹, ranging from 9 to 2094 g C m⁻² a⁻¹. The *NPP* produced in China's cropland represents 8% of global crop biomass, suggesting that it makes a large contribution of the croplands, which add to the world's carbon pool. Greater county-level *NPP* density (g C m⁻² a⁻¹) (*NPPD*) primarily exists in the humid and semi-humid regions of eastern China, as well as in the regions of northwest China with more developed

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA05050509); 国家自然科学基金资助项目 (41401240)

收稿日期: 2014-11-12; **网络出版日期:** 2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzshi@issas.ac.cn

irrigation. Lower NPP density occurs in arid and semi-arid regions of northwest China. The Huanghuaihai region produced the largest NPP among 9 agricultural regions. While the area of sown land accounted for 98% of this difference, the density of NPP could only explain 31% of the variance among the 9 agricultural regions. The NPPD of Northeast China was the highest and that of the Qinghai-Tibet Plateau as the lowest. In order to assess the impact of climate and fertilizer on NPPD in all 9 agricultural regions, we analyzed the relationships between NPPD and T_0 , P_0 (the sum of the daily temperature above 0°C and precipitation in 2010, respectively), T_{10} , P_{10} (the sum of the daily temperature above 10°C and precipitation in 2010, respectively), T (the average temperature in 2010), TT (the average diurnal temperature difference in 2010), P (the average precipitation in 2010), PP (total amount of precipitation in 2010), S (the total hours of sunshine in 2010), and the consumption of chemical fertilizer in 2010. The results indicated that all the factors considered could influence the distribution of NPPD; however, the most influential factors varied among the 9 regions.

Key Words: Crop; Net primary productivity (NPP); NPP density; harvest index; root to shoot ratio; spatial variability

净初级生产力(NPP)是生态系统在一段时间内所固定的碳总量,是由光合作用所产生的有机质总量扣除自养呼吸后的剩余部分。这些有机物质被分配到植物的地上和地下部分,用于植物的生长和繁殖。净初级生产力是地表碳循环的重要组成部分,是判定生态系统碳汇和调节生态系统过程的主要因子^[1]。农业植被净初级生产力代表了农田生态系统通过光合作物固定大气中 CO₂ 的能力,决定了农田土壤中可获得的有机质的含量。农作物每年通过光合作用产生的 NPP 为 7.8 Pg C, 占全球 NPP 总量的 16%^[2-3], 因此农田净初级生产力在全球碳平衡中扮演着重要作用。中国作为一个农业大国,准确估算农田生态系统产生的 NPP 有助于了解农作物在全球碳循环中的贡献。

目前,估算区域尺度农业植被净初级生产力的方法主要有两种:第一,利用作物产量的统计数据及各作物的相关参数进行估算。Prince^[4]利用收获指数、根冠比数据,结合以县为单位的作物种植农业统计数据估算了美国中西部的 NPP,结果表明 1992 年美国西部以县为单位的 NPP 的变化范围从 4 Mg hm⁻² a⁻¹ 到大于 17 Mg hm⁻² a⁻¹。Hicker^[2]利用以县为单位的作物种植面积和作物产量数据研究了美国 1972—2001 年农田 NPP 的时间变化情况,以县为单元作图呈现了 NPP 的空间分布情况,发现 NPP 时间上呈现增加趋势,空间分布上差异显著。黄耀^[5]利用以省为单位的农业统计数据结合收获指数和根冠比参数估算了 1950—1999 年中国农田产生的 NPP,结果表明研究期间 NPP 增加非常明显。1950s、1960s、1970s、1980s 和 1990s 年代,农田产生的 NPP 平均值为(146±32)、(159±34)、(260±55)、(394±85) Tg C/a 和(513±111) Tg C/a。黄耀利用统计数据估算了中国农田的 NPP,但是因为采用以省为单位的估算单元,NPP 的空间分布情况不容易呈现。Bolinder^[6]认为利用农业统计数据估算农田产生的 NPP 的方法直接简单,并且获得的估算结果很容易随着数据的更新和参数的完善而提高估算精度。利用农业统计数据估算国家尺度或区域范围的 NPP 时,估算单元越小,相关参数(如收获指数、根冠比)数据越多,估算结果越接近于真实值,估算结果越容易作图表现。

第二,利用模型估算植被净初级生产力在国内外得到广泛应用^[7-9]。Hicke^[10]利用 17a 的卫星数据和 CASA 模型模拟了北美 NPP 并分析了其变化对 C 库的影响。王彧^[11]利用 Crop-C 模型结合 GIS 空间数据库模拟了我国 6 种作物主产区的净初级生产力。模拟结果表明,自 1980 年以来,中国农业植被净初级生产力呈增加趋势,从 1980 年的 472.9 Tg C 增加到 2000 年的 607.2 Tg C。闫慧敏^[12]利用卫星遥感数据驱动的 GLO-PEM 模型估算了 1981—2000 年中国农田生态系统净初级生产力。认为研究时期内中国农田生产力总量增加,但仍有 24% 的农田生产力下降。利用模型估算农田产生的 NPP 虽然得到广泛应用,然而,由于农业系统的复杂性,国外模型应用到中国的农田生态系统时,在模型参数的可获得性和模型的有效性方面存在很大不确定性。国内自行研发的模型较少,已有模型虽然考虑了中国实际情况,但生态机理方面考虑不足或存在简化,使估算结果存在较大的不确定性。另一方面,不论是国内模型还是国外模型,估算区域农田 NPP 时,都需要用农业统计数据和相关参数的估算结果进行验证。

目前,中国利用农业统计数据估算 NPP 时可使用的相关参数(收获指数、根冠比)数据较少而且年代久远,收获指数大多采用张福春^[13]20 世纪 80 年代的测定数据,根冠比数据来自不同的文献。参数数据较老以及缺乏统一的数据源,增加了用农业统计数据估算 NPP 的不确定性。另一方面,不论是利用模型还是农业统计数据估算 NPP,我国农业 NPP 的估算值多数是 2005 年之前的数据,近些年数据空白,不利于评估中国农田在全球气候变化中的作用。鉴于目前存在的问题,确立了本文的研究目的:建立农作物新的参数数据库,并结合利用农业统计数据估算 NPP,明确近些年中国农田可产生的 NPP,了解 NPP 的空间分布情况,为研究中国农田在全球变化中的作用提供数据支持。本研究将中国划分为 9 个农业类型区,2011—2012 年在不同农业类型区内实测作物生物量数据获得了 9 个农业区内水稻、小麦、玉米、大豆、油菜、棉花的干燥系数(DC , dry coefficient)、收获指数(HI , harvest index)和根冠比(R/S , root to shoot ratio)数据,建立了一套最新的农作物参数数据库。结合 2010 年农作物产量统计数据,以县为单元估算了中国农作物产生的 NPP,并绘制了以县为单位的 NPP 密度图和 NPP 分布图,讨论了 NPP 区域分布特征。

1 数据来源与研究方法

1.1 作物生物量样品采集

根据气候条件、主要农作物分布和复种指数、耕地面积分布和土壤类型特点,并结合中国农业区划兼顾全国尺度上大致均匀的原则,在全国选取了 59 个典型县(图 1),2011—2012 年在全国采集了水稻、玉米、小麦、大豆、棉花、油菜 6 种主要作物的生物量。每个典型县选取一到两种种植面积广的主要作物在收获期采集,如有轮作的,需要采集每个季节的作物样品。每种作物设置一个采样点,每个采样点设 3 个重复。样品在作物成熟收获前采集作物的籽粒、秸秆和根系。作物根系生物量采用“挖土块法”^[14]获取,样方的面积不小于 0.25 m²。玉米和棉花根系挖掘的样方深度为 50 cm,水稻、小麦、油菜和大豆根系挖掘的样方深度为 30 cm。籽粒和秸秆经风干、烘干后获得籽粒、秸秆生物量,根系经过清洗、烘干后获得根系生物量,然后根据公式 1—3 计算每个采样点每种作物的干燥系数、收获指数和根冠比^[15-17]。

1.2 数据来源

2010 年中国 2709 个县农作物经济产量、种植面积统计数据来自中国农业科学院农业信息研究所。

1.3 点到区域拓展方法

2011—2012 年在全国获得了 111 个样点的干燥系数、收获指数和根冠比数据以及 2709 个县作物产量等统计数据,为了计算每个县的 NPP,采用以下原则把样点数据拓展到全国农作物种植区:

1) 以全国农业区划委员会编制的《中国综合农业区划》为基础,结合县级行政单元的完整性,将全国划分为 9 个农业区(图 1),农业区内每种作物的干燥系数、收获指数和根冠比的区域值取该农业区内此种作物所有样点的算术平均值。农业区内没有采样点时,农业区作物的干燥系数、收获指数和根冠比的值取最邻近点的值;最后获得了 9 个农业区 6 种作物的干燥系数、收获指数、根冠比(表 1);

2) 每个县每一种作物的干燥系数、收获指数和根冠比取该县所在农业区的值计算 NPP;

3) 由于大豆和棉花的主要种植区域比较集中,只在东北采集了大豆,在新疆采集了棉花。因此全国每一个县大豆的干燥系数、收获指数和根冠比的值采用所有采样点的平均值;每一个县棉花的干燥系数、收获指数和根冠比的值采用所有采样点的平均值;

4) 同一农作物如水稻是轮作作物,研究中不分早晚稻,都作为水稻处理;将统计数据中的油料作物作为油菜处理。

1.4 NPP 计算方法

本研究中将农作物的 NPP 分为地上生物量和地下生物量分别计算,地下生物量为收获时采集的根系生物量。首先计算出每个县每种作物的 NPP,相加得到每个县 6 种农作物的 NPP。每个县的 NPP 相加得到全国农作物的 NPP。每个县 6 种作物的 NPP 相加后除以 6 种作物的种植面积得到这个县 NPP 密度值。全国

所有县 NPP 相加除以作物的种植面积得到全国农作物的 NPP 密度。

表 1 不同农业区的收获指数(HI)、根冠比(R/S)和干燥系数(DC)

Table 1 Harvest Indices (HI)、Root to Shoot Ratio (R/S) and Dry Coefficient (DC) among 9 agricultural regions

指标 Indices	作物类型 Crop type	1	2	3	4	5	6	7	8	9
收获指数 HI	水稻	0.52	0.50	0.37	0.46	0.57	0.58	0.50	0.49	0.55
	小麦	0.50	0.45	0.50	0.42	0.45	0.34	0.46	0.54	0.42
	玉米	0.48	0.43	0.51	0.51	0.48	0.56	0.48	0.44	0.54
	大豆	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
	油菜	0.49	0.49	0.37	0.49	0.37	0.23	0.22	0.49	0.24
	棉花	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
根冠比 R/S	水稻	0.13	0.18	0.06	0.25	0.17	0.11	0.20	0.19	0.14
	小麦	0.20	0.15	0.20	0.15	0.24	0.14	0.28	0.16	0.06
	玉米	0.11	0.14	0.13	0.16	0.12	0.13	0.15	0.11	0.16
	大豆	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	油菜	0.20	0.20	0.22	0.20	0.22	0.15	0.18	0.20	0.12
	棉花	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
干燥系数 DC	水稻	0.94	0.94	0.92	0.89	0.88	0.92	0.89	0.91	0.91
	小麦	0.92	0.95	0.92	0.95	0.93	0.90	0.90	0.94	0.91
	玉米	0.90	0.96	0.89	0.92	0.89	0.92	0.92	0.91	0.92
	大豆	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	油菜	0.96	0.96	0.93	0.96	0.93	0.90	0.88	0.96	0.92
	棉花	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91

计算公式如下:

$$DC = \text{籽粒烘干生物量} / \text{籽粒风干生物量} \tag{1}$$

$$HI = \text{籽粒烘干生物量} / \text{地上部分烘干生物量} \tag{2}$$

$$R/S = \text{根系烘干生物量} / \text{地上部分烘干生物量} \tag{3}$$

$$S_{ji} = \left[\frac{Y_{ji} \times DC_{ni}}{HI_{ni}} \right] \times 0.45 \tag{4}$$

$$B_{ji} = \left[\frac{Y_{ji} \times DC_{ni} \times (R/S)_{ni}}{HI_{ni}} \right] \times 0.45 \tag{5}$$

$$T = \left[\sum_{j=1}^{2709} \sum_{i=1}^6 (S_{ji} + B_{ji}) \right] \times 0.45 \tag{6}$$

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^6 T_{ji}}{\sum_{i=1}^6 A_{ji}} \tag{7}$$

$$D = \frac{T}{\sum_{j=1}^{2709} \sum_{i=1}^6 A_{ij}} \tag{8}$$

式中, Y_{ji} , S_{ji} , B_{ji} , 和 A_{ji} 分别表示表示统计数据中第 j 个县第 i 种作物的产量、地上生物量、地下生物量和作物的种植面积; DC_{ni} , HI_{ni} 和 $(R/S)_{ni}$ 分别表示第 n 个农业区第 i 种作物的干燥系数、收获指数和根冠比; T 表示全国农作物产生的 NPP, D_j 表示第 j 个县单位面积农作物的 NPP, D 表示全国农作物单位面积 NPP 的平均值

采用的分析软件有 excel2007, SPSS13.0, 图件用 Origin 8.0, ArcMap 9.3 完成。

2 结果与讨论

2.1 农作物 NPP 及其空间分布格局

以县级行政单元为单位估算了 2010 年中国农作物产生的 NPP。结果表明,我国农作物 2010 年产生的 NPP 为 596 Tg C,地上生物量为 517 Tg C,秸秆量为 242 Tg C,地下生物量为 80Tg C,地上生物量是地下生物量的近 6.5 倍。Potter^[3] 估算农作物每年产生的 NPP 为 7.8 Pg C,因此中国农田内产生的 NPP 占全球 NPP 总量的 8%,中国农田在全球碳循环中有重要作用。

从区域分布看,NPP 的空间分布不平衡。NPP 较大的地区主要集中在东北的松嫩三江平原,黄淮海平原、长江中下游平原、西南的四川盆地和华南的珠江流域(图 2)。本研究获得的 6 种作物在中国的种植面积为 115 Mhm²,因此,我国农田 NPP 密度的平均值等于 519 g C/m²。NPP 密度介于 9—2094 g C/m²,变异系数

为 33%,属于中度变异(表 2)。全国有 36%的县域 NPP 密度大于全国均值,相邻县域之间 NPP 密度的差异最大可达 96%。从空间分布看,NPP 密度较高的地区主要集中在中国的东部的湿润、半湿润地区的平原和盆地地区以及西北内陆灌溉条件较好的地区,如松嫩三江平原、黄淮平原、四川盆地、河套平原,宁夏平原以及新疆的绿洲地区(图 3),西北的干旱半干旱地区有水源灌溉的山麓地带 NPP 密度很高。对比图 2 和图 3 可以发现 NPP 的分布和 NPP 密度的分布并不一致,尤其是西北地区。位于干旱半干旱地区的农田,有水源的,单位面积农田中 NPP 高,缺少水源的,NPP 密度较低,由于每个县耕地面积相对较小,NPP 总量不大。

王彧^[11]利用 Crop-C 模型模拟了我国 6 种作物主产区的净初级生产力,1980 年为 472.9Tg C,2000 年为 607.2Tg C。与模拟结果相比,2010 年中国农作物产生的 NPP 比 1980 年增加了 26%,比 2000 年减少了 2%。黄耀^[5]利用以省为单位的农业统计数据估算了 1950—1999 年中国农田产生的 NPP,1980s 和 1990s 年代,农田产生的 NPP 平均值为(394±85) Tg C/a 和(513±111) Tg C/a,与 20 世纪 80 年代相比,2010 年中国农田产生的 NPP 增加了 51%,与 20 世纪 90 年代相比,2010 年中国农田产生的 NPP 增加了 16%。与过去相比,中国农田的净初级生产力显著增加。

表 2 NPP 和 NPPD 基本特征

Table 2 Characteristics for NPP and NPP Density (NPPD)

项目 Items	统计特征/ Statistical characteristic								
	N	Mean	Min	Max	25%	Median	75%	S. D.	C.V.
NPP/(Tg C)	2316	257.3	0.03	2778.06	63.28	148.62	340.83	305.51	119%
Net primary productivity									
NPPD/(g C/m ²)	2316	519.0	8.5	2094	394.1	472.99	558.5	156.66	30%
Net primary productivity density									

从 NPP 的空间分布格局看,在青藏区和甘新区,本研究的研究结果与王彧用 Crop-C 模型模拟的结果较相似,其他区域差别较大;与闫慧敏用 GLO-PEM 模型模拟的结果比较,除了青藏区外其他区域较相似。不同的 NPP 估算模型对同一区域 NPP 估算存在较大差异^[18],模型的建立多设定有一定条件,考虑最普遍的现象和规律,即模型的普适性,对某些区域可能不适合,如青藏高原特殊的气候环境,在利用模型模拟时需要特殊考虑。Bolinder^[6]认为利用统计数据结合作物参数估算 NPP 的方法更直接和容易实现,而且估算结果很容易随着数据的完善而更新。本研究利用 2011—2012 实测调查建立了农作物新的参数数据库,利用该数据库进

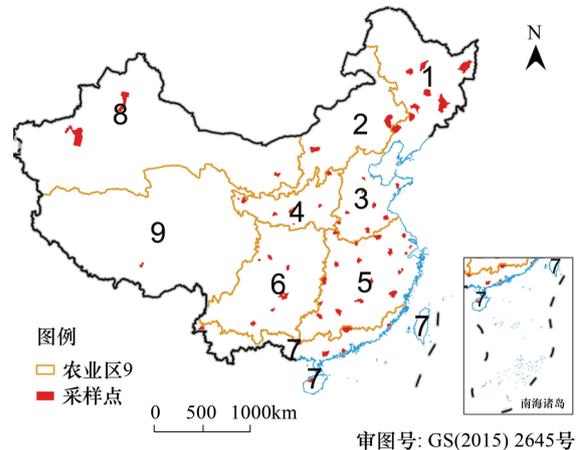


图 1 全国农业区的划分和采样点分布

Fig.1 Distribution of agricultural regions and sampling counties

1: 东北区;2: 内蒙及长城沿线区;3: 黄淮海区;4: 黄土高原区;5: 长江中下游区;6: 西南区;7: 华南区;8: 甘新区;9: 青藏区

行估算能反映当前中国农田 NPP 的分布情况。

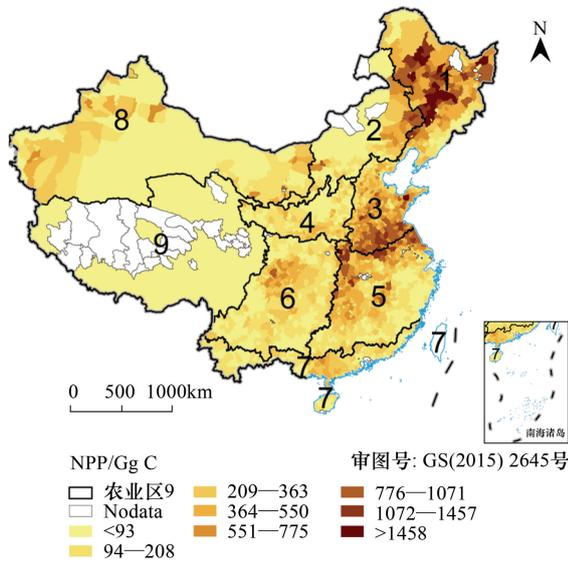


图 2 2010 年农作物的 NPP 分布
Fig.2 Spatial distribution of crop NPP in 2010

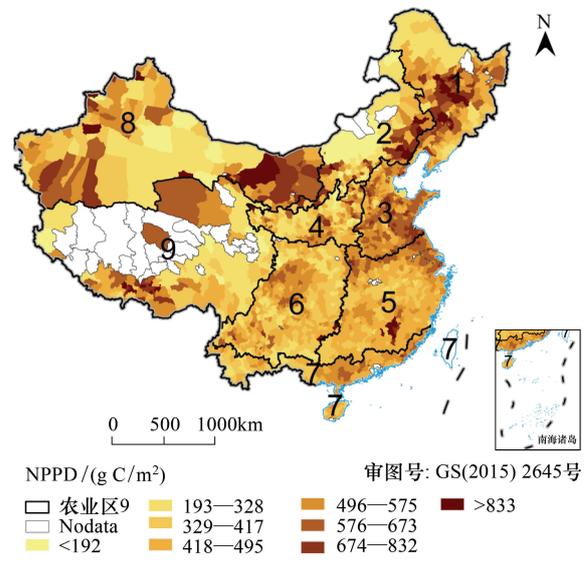


图 3 2010 年农作物 NPP 密度分布
Fig.3 Spatial distribution of crop NPP density in 2010

2.2 不同区域之间 NPP 的差异

为研究 NPP 的空间分布情况,比较了不同农业区的 NPP 总量和 NPPD(表 3)。以不同区域 NPP 而论,将全国划分为 9 个农业区中,黄淮海区的 NPP 最多(172.8Tg C)、其次为长江中下游区(136.1Tg C)和东北农业区(112.5Tg C),分别占全国 NPP 总量的 29%、23%、19%。黄淮海农业区和长江中下游农业区产生的 NPP 相加占到全国 NPP 总量的一半。青藏农业区产生的 NPP 最少(1.1Tg C),黄淮海农业区产生的 NPP 是青藏区的 160 倍,不同区域 NPP 总量存在着较大差别,空间分布不平衡。从 NPPD 看,东北区单位面积农田产生的 NPP 最高(582.9g C/m²),其次为黄淮海农业区(567.4g C/m²)、甘新区(534.5 g C/m²),青藏区单位面积农田产生的 NPP 最低,最大值是最小值的 1.5 倍。

表 3 9 个农业区 NPP、种植面积及 NPPD

Table 3 The NPP, sown area and NPP density among 9 regions

区域 Code	农业区域 Agricultural regions	NPP/(Tg C) Net primary productivity	种植面积/Mhm ² Sown area	NPPD/(g C/m ²) NPP density
1	东北区	112.5	19.3	582.9
2	内蒙古及长城沿线区	22.0	4.3	513.0
3	黄淮海区	172.8	30.5	567.4
4	黄土高原区	32.9	7.6	433.9
5	长江中下游区	136.1	27.8	489.1
6	西南区	69.5	15.0	462.1
7	华南区	25.5	5.6	452.3
8	甘新区	24.1	4.5	534.5
9	青藏区	1.1	0.3	377.7
	总和	596.3	115	519.0

将每个区域的 NPP 分别与种植面积和 NPPD 比较,发现不同区域 NPP 的变化趋势与种植面积的变化趋势一致。进一步,将 9 个区域的 NPP 分别与种植面积和 NPPD 做回归分析,结果表明种植面积能解释 98% 的区域变异,NPPD 能解释 31% 的区域变异。如果将全国划分为 38 个农业区(图 1),种植面积仍能解释 98% 的

区域变异,而 NPPD 只能解释 22%的区域变异(图 4),由此说明农业区域间 NPP 总量的差异主要由作物种植面积

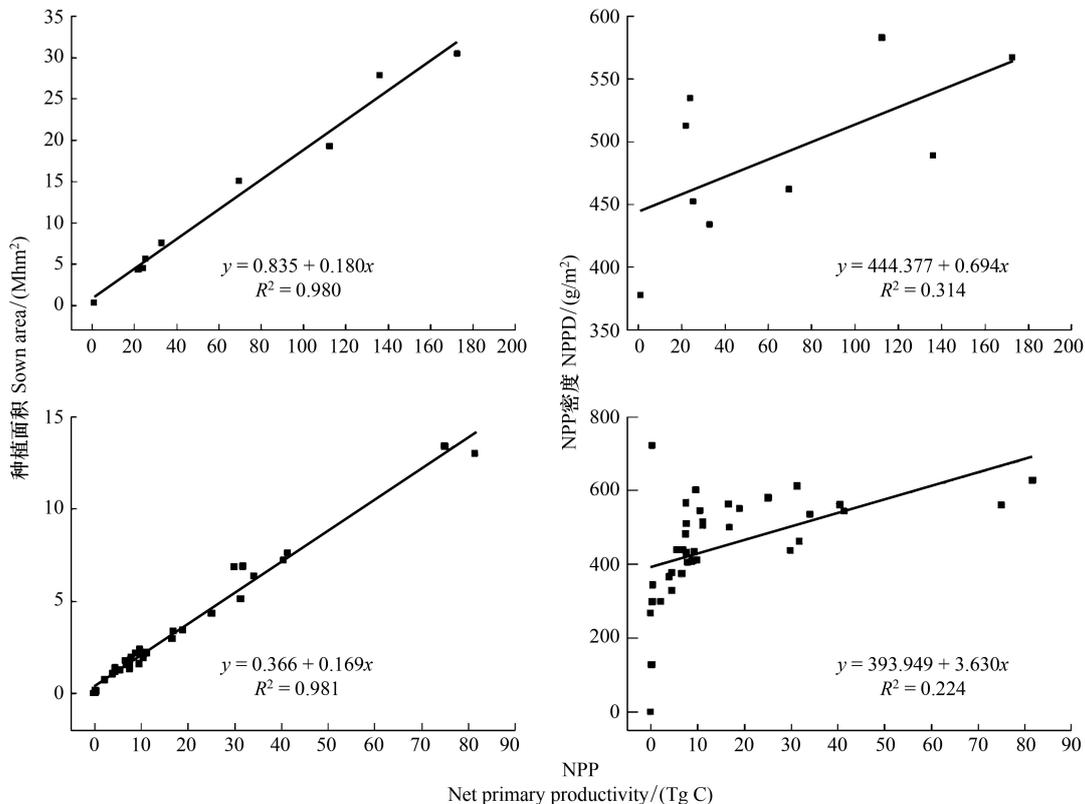


图 4 不同区域农作物 NPP 与种植面积和 NPPD 的关系

Fig.4 Relationship between NPP and sown area and relationship between NPP and NPP density among regions

2.3 不同因子对 NPPD 变化的影响

农田生态系统 NPP 密度的空间差异受到多方面因素的影响,包括气候类型、土壤类型、耕作制度、农业投入等因素。气候因子对植被 NPP 的空间差异有显著影响,尤其是气温和降水^[19]。将 9 个农业区域内各县域 NPP 密度(NPPD)与 2010 年每个县年日照时数(S)、年均气温(T)、年均温差(TT)、大于 0 摄氏度的积温(T_0)、大于 10 摄氏度的积温(T_{10})、年均降水量(P)、年总降水量(PP)、大于 0 摄氏度的年累积降水量(P_0)、大于 10 摄氏度的累积降水量(P_{10})做相关分析(表 4)。结果表明东北地区(1)和内蒙古及长城沿线区(2)农田中单位面积 NPP 都与积温有极显著正相关关系,这两个区域纬度相对较高,大部分地区只能一年一熟,热量限制了农业发展,影响了农田净初级生产力的提高。内蒙古及长城沿线区(2)和黄淮海区(3)都与降水量有极显著正相关关系。内蒙古及长城沿线区大部分处于半干旱地带,缺少灌溉水源,黄淮海区以旱地为主,常发生春旱,因此降水量对农田净初级生产力影响较明显;长江中下游区(5)农田单位面积 NPP 与日照时数和年均温差呈极显著正相关关系,与平均气温、大于 0 和 10 摄氏度的积温、降水量呈极显著负相关关系。长江中下游区降水量相对较丰富,NPP 主要受制于太阳辐射。2010 年长江中下游地区降水偏多,高温和连续阴雨天气,减少了光照时间,不利于作物生长,影响农田生态系统的生产力。西南区(6)农田单位面积 NPP 与所有降水量指标呈显著负相关关系,2010 年,西南地区降水偏少,发生了大旱,影响了该区农田生态系统的生产力;华南区(7)农田单位面积 NPP 与平均气温、大于 0 摄氏度积温、大于 10 摄氏度的积温、年均温差均呈正相关关系。该农业区平均气温和积温最高,复种指数高,作物生长期长;甘新区(8)农田单位面积 NPP 与年均温差呈显著负相关关系,与降水总量呈显著正相关关系。本区光能资源丰富,作物生长期,晴天多,辐射强,热量

表 4 NPPD 与气温、降水及肥料相关分析
Table 4 Correlation between NPPD and temperature, precipitation, fertilizer

区域 Code	相关系数 Pearson correlation coefficient	化肥 Chemical fertilizer	氮肥 N fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	日照时 数(S) Hours of sunshine	平均温 度(T) Mean temperature	年均温 差(TT) Temperature difference	>0°C 积 温(T ₀) 温/(T ₀) above 0°C	>10°C 积 温/(T ₁₀) 温/(T ₁₀) above 10°C	年均降水 量(Mean precipitation)	年总降水 量(Total precipitation)	>0°C 降水 量/(P ₀) Precipitation above 0°C	>10°C 降水 量/(P ₁₀) Precipitation above 10°C
1	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.157 0.056 150	0.155 0.058 150	0.159 0.053 150	0.178 0.088 93	-0.109 0.297 93	0.009 0.933 93	0.317** 0.002 93	0.339** 0.001 93	-0.131 0.21 93	-0.103 0.326 93	-0.098 0.352 93	-0.144 0.169 93
2	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.453** 0 100	0.436** 0 100	0.173 0.085 100	-0.293 0.051 45	0.592** 0 45	-0.511** 0 45	0.634** 0 45	0.622** 0 45	0.402** 0.006 45	0.407** 0.006 45	0.425** 0.004 45	0.409** 0.005 45
3	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.226** 0 318	0.184** 0.001 318	0.121* 0.032 318	0.063 0.633 59	0.009 0.943 59	-0.209 0.111 59	-0.001 0.994 59	-0.049 0.711 59	0.309* 0.017 59	0.310* 0.017 59	0.327* 0.012 59	0.231 0.078 59
4	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.365** 0 195	0.289** 0 195	0.343** 0 195	-0.189 0.163 56	0.195 0.151 56	-0.212 0.117 56	0.164 0.226 56	0.16 0.239 56	0.224 0.096 56	0.154 0.257 56	0.171 0.207 56	0.2 0.139 56
5	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.082 0.084 445	0.217** 0 445	0.066 0.166 445	0.404** 0 157	-0.244** 0.002 157	0.300** 0 157	-0.267** 0.001 157	-0.282** 0 157	-0.491** 0 157	-0.476** 0 157	-0.477** 0 157	-0.463** 0 157
6	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.199** 0 378	0.182** 0 378	0.061 0.238 378	-0.162 0.073 124	0.11 0.222 124	0.048 0.595 124	0.126 0.164 124	0.095 0.294 124	-0.166 0.065 124	-0.201* 0.025 124	-0.200* 0.026 124	-0.205* 0.022 124
7	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.375** 0 137	0.280** 0.001 137	0.231** 0.007 137	-0.165 0.213 59	0.376** 0.003 59	0.466** 0 59	0.347** 0.007 59	0.302* 0.02 59	0.132 0.318 59	0.163 0.218 59	0.163 0.218 59	0.131 0.324 59
8	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.019 0.869 82	0.074 0.509 82	0.057 0.613 82	-0.059 0.611 76	0.046 0.695 76	-0.249* 0.03 76	0.007 0.954 76	0.000 0.998 76	0.164 0.158 76	0.239* 0.037 76	0.274* 0.017 76	0.319** 0.005 76
9	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.535** 0 54	0.565** 0 54	0.261 0.057 54	0.331* 0.016 53	0.303* 0.028 53	-0.348* 0.011 53	0.386** 0.004 53	0.348* 0.011 53	-0.304* 0.027 53	-0.317* 0.021 53	-0.290* 0.035 53	-0.05 0.724 53

条件好,昼夜温差大,有利于物质积累。由于本区年降水量较小,限制了农业发展,但阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等高山地区降水量比较丰富,形成了永久积雪和现代冰川,夏季则部分消融补给河流,成为山麓地带农田灌溉的主要水源,发展了绿洲农业,单位面积农田中 NPP 比其他区域高;青藏区(9)农田单位面积 NPP 与日照时数、平均气温和积温有呈显著正相关关系,与年均温差、降水量呈显著负相关关系。青藏区农业生产的优势是日照时间长,劣势是海拔高,气温低,不利于作物生长,但河谷地带海拔较低,热量相对充足,有利于 NPP 的积累。

使用肥料不仅可以增加农作物的产量,而且可以提高 NPP 量^[20-21]。将 9 个农业区域内各县域 NPP 密度(NPPD)与每个县单位面积农用化肥施用量、氮肥施用量、复合肥施用量做相关分析,通过分析发现(表 4),除了东北区(1)和甘新区(8)外,农田单位面积 NPP 量均与化肥使用量呈极显著正相关关系,在这些地区施用化肥有助于提高农田净初级生产力。东北区农田净初级生产力与施肥量关系不密切,与土壤类型有关。通过将 2010 年土地利用图^[22]与中国 1:100 万土壤类型图叠加,发现东北区农业土壤主要以草甸土(32%)、黑土(14%)、暗棕壤(12%)和黑钙土(11%)为主,这几种土壤中有机质含量很高,土壤肥力很高,施肥量对东北区农田的影响不如其他地区明显。甘新区的农业土壤主要以盐土(15%)、草甸土(12%)、灌淤土(11%)、潮土(11%)、棕漠土(8%)和灰钙土(8%)为主,这些土壤多以沙质土壤为主,保肥能力差,施肥量对农田净初级生产力的影响亦不如其他地区敏感。

3 结论

本研究利用实测调查建立了农作物新的参数数据库,并结合利用农业统计数据估算了 2010 年中国农作物净初级生产力。结果表明,中国农田可产生大量的 NPP,中国农田在全球碳循环中有重要作用。农田中 NPP 的空间分布不平衡,NPP 较大的地区主要分布在东北农业区,黄淮海农业区、长江中下游农业区。黄淮海区产生的 NPP 最多,青藏区最低,不同区域间 NPP 的差异主要由作物种植面积的差异引起。化肥施用量、日照时数、气温和降水对 NPP 密度的空间分异均有影响,但不同区域的主导因素不同。通过比较统计数据的计算结果和模型模拟结果,发现本研究的 NPP 空间分布与模拟结果有差异,今后利用模型模拟青藏高原等区域的净初级生产力时需要考虑其特殊的自然环境。

致谢:本研究中全国作物生物量样品由中国科学院南京土壤研究所、沈阳应用生态研究所、西北水土保持研究所、亚热带农业研究所、地理科学与资源研究所、东北地理与农业生态研究所、成都山地灾害与环境研究所、西南大学、新疆地理研究所、遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心等单位共同采集。感谢张旭东研究员、韩晓增研究员、欧阳竹研究员、胡春胜研究员、张甘霖研究员、黄标研究员、赵世伟研究员、赵成义研究员、吴金水研究员、肖和艾副研究员、谢德体教授、朱波研究员以及他们的研究团队提供了生物量样品。

参考文献(References):

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] Hicke J A, Lobell D B, Asner G P. Cropland area and net primary production computed from 30 years of usda agricultural harvest data. *Earth Interactions*, 2004, 8(10): 1-20.
- [3] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek, P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [4] Prince S D, Haskett J, Steininger M, Strand H, Wright R. Net primary production of U.S. midwest croplands from agricultural harvest yield data. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 1194-1205.
- [5] Huang Y, Zhang W, Sun W J, Zheng X H. Net primary production of chinese croplands from 1950 to 1999. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692-701.
- [6] Bolinder M A, Janzen H H, Gregorich E G, Angers D A, VandenBygaart A J. An approach for estimating net primary productivity and annual

- carbon inputs to soil for common agricultural crops in canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/4): 29-42.
- [7] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 黄玫, 郭瑞, 郝卫平, 夏旭. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态. *生态学报*, 2014, 34(6): 1490-1502.
- [8] 刘海桂, 唐旭利, 周国逸, 刘曙光. 1981—2000 年广东省净初级生产力的时空格局. *生态学报*, 2007, 27(10): 4065-4074.
- [9] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [10] Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, Tucker C, Los S, Birdsey R, Jenkins J C, Field C, Holland E. Satellite-derived increases in net primary productivity across North America, 1982-1998. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 69-1-69-4.
- [11] 王戎, 黄耀, 张稳, 于永强, 王平. 中国农业植被净初级生产力模拟(II)——模型的验证与净初级生产力估算. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 916-925.
- [12] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. *地理学报*, 2007, 62(2): 171-180.
- [13] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83-87.
- [14] Böhm W. *Methods of Studying Root System*. Berlin: Springer, 1979.
- [15] Allmaras R R, Nelson W W, Voorhees W B. Soybean and corn rooting in southeastern minnesota. II. Root distributions and related water inflow. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1975, 39: 771-777.
- [16] Donald C M. In search of yield. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 1962, 28: 171-178.
- [17] Snyder F W, Carlson G E. Selecting for partitioning of photosynthetic products in crops. *Advances in Agronomy*, 1984, 37: 47-72.
- [18] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [19] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [20] Allmaras R R, Linden D R, Clapp C E. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage, and stover management. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1366-1375.
- [21] Stewart W M, Dibb D W, Johnston A E, Smyth T J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 2005, 97(1): 1-6.
- [22] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.