

冀中南地区农田生物生产力与碳截获能力 时空变化分析

胡乔利^{1,2}, 沈彦俊¹, 陈福军², 齐永青¹, 张玉翠¹

(1.中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,河北 石家庄 050021;2.河北师范大学资源
与环境科学学院,河北 石家庄 050016)

摘要:以6期(1985年、1990年、1995年、2000年、2005年和2008年)土地利用数据和1984~2008年的粮食产量数据为基础,对冀中南地区农田生物生产力和碳截获能力进行了估算,并对其时空差异特征及其影响因素进行了分析。结果表明:自20世纪80年以来,冀中南地区农田中生物生产力和碳截获能力表现为增强趋势,总生物量和碳截获总量分别达到0.065 Pg和0.025 Pg。农田的碳截获能力具有空间差异性。山前平原地区农田的生物生产力和碳截获能力均比较大,而在西部山区和东部低平原区表现较低。随着农田生物生产力和碳截获能力的增强,加速了碳循环和碳汇的过程。虽然农田碳截获总量很大,而且只是动态的碳库,但是如果能够合理利用必将增加农田的实际固碳能力。

关键词:粮食;固碳;生物量;收获指数

中图分类号:S154 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2012)02-0219-06

在全球气候变化的背景下,温室气体增加导致气候变暖、冰川消融、海面上升,以及旱灾、水灾、雪灾等灾害频发,由此引发了人们的广泛关注。为了应对气候变化,许多学者纷纷投入到碳循环以及节能减排的研究之中。目前碳循环研究和气候变化研究已深入到工业、农业、森林、土地利用变化等领域^[1-9],研究手段涉及到从调查数据的推算到遥感数据的应用和陆地碳循环模型模拟等多种方法。中国农田生产能力在过去几十年中翻了两番,粮食总产量从建国初的 $1\ 131.8\times 10^8\text{kg}$ 增加到2008年的 $5\ 287.09\times 10^8\text{kg}$ ^[10,11]。粮食作物的光能利用效率和碳截获能力也都有较大幅度的提升。农作物从生长到消亡,经历一个由碳汇到碳源的过程。随着粮食产量的增加以及碳截获能力的增强,进而增加了地气系统碳流通或碳交换。因此,农田生态系统在碳循环中可以看作是一个动态碳库,在地气系统碳循环中起到重要的调节作用。

冀中南地区作为中国的重要粮食产区和典型农业区,粮食产量约占中国的5.05%^[11,12]。农田截获的大量碳以作物秸秆和粮食籽粒的形式得以短期固定,而近20 a来广泛施行的秸秆还田及保护性耕作措施将大量农田生物量归还土壤,极大地提升了土壤有机碳的储存。据研究,华北山前平原典型农田的土壤有机质含量已经从20世纪80年代的0.9%提高到目前的约1.5%左右^[13-15],达到了较高的水平。本文根据冀中南地区20世纪80年代以来的粮食产量的统计数据,结合土地利用和农业生产条件的发展变化,研究农田碳截获能力的时空分异特征,以为气候变化和农田系统碳循环研究提供数据支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

冀中南地区位于 $36^{\circ}05'N\sim 39^{\circ}34'N$, $113^{\circ}11'E\sim 117^{\circ}28'E$ (图1),包括河北省中南部的华北

收稿日期:2011-01-01; **修订日期:**2011-07-21

基金项目:国家科技支撑计划重点项目(2008BAD95B12)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX1-YW-08-03-07)、河北师范大学研究生科研项目(200902014)资助。

作者简介:胡乔利(1982-),男,河北保定人,工程师,主要从事遥感与GIS、土地利用变化、农业生物固碳等方面的研究。E-mail: huqiaoli2008@sohu.com

通讯作者:沈彦俊,研究员,博士生导师。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

平原和太行山地区的一部分,由100个县(市)组成,人口约4 418.9万人^[12]。地势由西向东倾斜,西部为山区、丘陵和高原,中部和东部为广阔的平原。冀中南地区属温带—暖温带大陆性季风气候,冬季寒冷少雪,夏季炎热多雨。

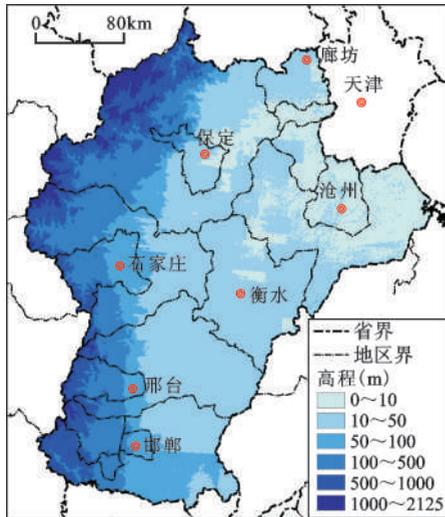


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area

1.2 研究方法

本文首先利用1984~2008年冀中南地区各县市的粮食产量数据和各种作物类型的收获指数求得农田的生物生产力,然后根据农作物根冠比和农作物含碳比以及生物生产力来计算农作物的碳截获能力,并结合6期(1985年、1990年、1995年、2000年、2005年和2008年)土地利用数据进行空间化,对碳截获能力的时空规律和影响因素进行了分析。

1) 生物生产力。在农业生产中,农作物生物量通常指地上部分秸秆和粮食籽粒的总干物质重量。因此,地上部分生物量的计算方法如下:

$$B_{i,j} = \frac{Y_{i,j}}{HI_{i,j}} \quad (1)$$

式(1)中, $B_{i,j}$ 表示*i*年*j*作物地上部分的生物量(kg/hm^2); $Y_{i,j}$ 表示*i*年内*j*作物的产量(kg/hm^2); $HI_{i,j}$ 表示*i*年*j*作物的收获指数(harvest index, HI)。文中 $Y_{i,j}$ 采用1984~2008年冀中南地区各县市的粮食产量。为了消除年际间的波动,本文采用5 a平均值对粮食的统计数据进行分析。

由于不同农作物的收获指数并不相同,而且相同作物在不同时期内的收获指数也不尽相同,在

生物量的计算过程中,为了确保计算结果的准确性,将农作物分类为小麦、玉米、油料作物和棉花,结合相关研究成果,确定小麦和玉米各自采用历年的收获指数^[16],而油料作物定为油菜和大豆的综合收获指数0.37^[17-20]。

最后,通过粮食产量和收获指数的计算,得出以县市为单位的农作物地上部分的生物生产力(生物量, B)。

2) 农作物碳截获能力。本文农作物的碳截获能力是通过农作物的生物量获得的,计算公式如下:

$$C_i = \sum_j [B_{i,j} \times (r+1)] \times \alpha \quad (2)$$

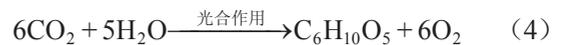
式(2)中, C_i 表示*i*年单位面积内所有农作物的碳截获总量,简称碳截获能力; $B_{i,j}$ 表示*i*年*j*作物地上部分的生物生产力; r 为作物的平均根冠比; α 为农作物的平均含碳比。

根冠比是指作物地下部分与地上部分的比值。张喜英在河北省栾城试验站经过实测认为冬小麦生长期根冠比在0.15~0.20左右;夏玉米成熟期的根冠比为0.10~0.15;谷子成熟期的根冠比降至0.23;高粱的根冠比从生长初期的0.80到收获期的0.53,均远大于小麦、玉米和谷子的根冠比^[21]。经过对冀中南地区粮食作物种植结构的分析,本文最后确定农作物采用统一的根冠比0.15。

虽然不同农作物的化学成分有所不同,但是农作物大部分由纤维素组成,因此本文假设农作物截获的碳都以纤维素的形式固定下来,从而通过生物量来估算其截获的大气 CO_2 量。纤维素的化学方程式为:



公式简化为:



由式(4)可知,作物经过光合作用后, CO_2 被固定到农作物体内,形成纤维素。由于碳元素约占纤维素的质量比约为44.44%,因此确定农作物的碳截获能力(农作物含碳量)占作物生物总量的44.44%。

2 结果分析

2.1 生物生产力变化特征

自20世纪80年代以来,随着社会经济的发展,农业生产水平得到了极大地改进,其中化肥施

用量由1985年的18.39 g/m²上升到2008年的49.84 g/m²,灌溉条件也得到了进一步的保证^[12,22]。因此,冀中南地区粮食单产有了显著的提高,增长了近1倍(图2)。然而,在1991年、2002年和2006年由于旱涝以及“增产不增收”的经济导向造成粮食减产,在图2中呈现出3个低谷。伴随着粮食单产的提高,根据公式(1)可知,农田的生物生产力也实现了高速的增长,2008年达1 200 g/m²。但是,粮食的消耗和秸秆的燃烧或分解使原本固定的碳、氮等重新释放,实现了碳、氮等的再次循环。因此,农作物生物生产力的提高增加了碳、氮的转移能力或循环力度。

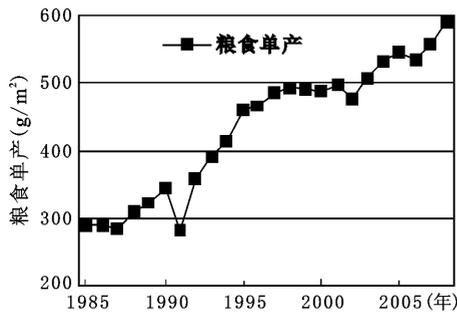


图2 冀中南地区的粮食单产
Fig.2 The annual per unit area grain yield in the mid-south parts of Hebei Province

2.2 碳截获能力特征分析

利用公式(2)得到农作物的碳截获能力即碳截获量分布情况,如图3。可以看出,太行山山前平原区农作物的碳截获能力最大,而且由700 g/m²左右上升到1 000 g/m²左右;低平原地区较小,且相差约400 g/m²;滨海地区农作物碳截获能力更低,仅为150 g/m²左右。从空间分异特征来看,山前平原地区农田的碳截获量最大,低平原地区逐渐减少,尤其是黑龙港地区碳截获量最小。在过去20多a里,整个研究区农作物碳截获总量由0.021 Pg上升到0.025 Pg,实现了碳截获能力的增长。在农作物生长过程中,虽然大量CO₂被固定到植物体中,但只有一小部分CO₂被固定到土壤碳库中,而大部分CO₂只是伴随着农作物的生长完成了碳循环的过程,因此农作物碳截获能力的增加加速了碳循环和碳汇的过程。农作物的碳截获量作为一个动态的碳库,虽然不能将碳完全固定下来,然而随着技术的提高,必然增加农田的固碳潜力。同时,正因为农作物碳截获量的动态特征以及增加的趋势,农田系统中碳交换能力也将逐渐增强。

2.3 影响因素分析

近年来,城市化进程加快导致优质耕地的减少^[23-26],进而减少了农作物的种植面积,在一定程

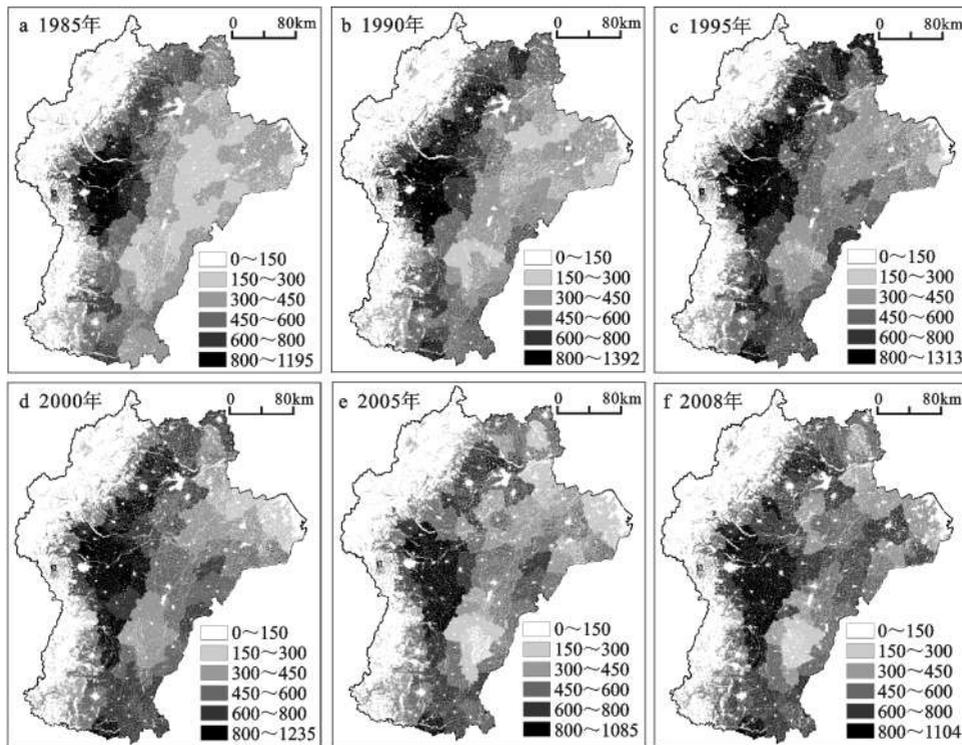


图3 冀中南地区农作物碳截获量分布(g/m²)
Fig.3 Carbon sequestration distribution in the mid-south parts of Hebei Province (g/m²)

度上削弱了农田的碳截获能力。在1985~2008年间,冀中南地区耕地面积下降281 487 hm²,降幅达到6.59%,农田内碳截获能力按500 g/m²计算,由于耕地的减少直接导致农田固碳量减少了1 407 435 t碳。然而,耕地的非农化主要出现在城乡结合部和农村居民点附近,并不是导致上文中碳截获能力时空变化的主要原因。而气候气象条件和作物品种、氮肥施用量、灌溉率、土壤肥力等农业生产条件对农田碳截获能力的时空分异特征有重要影响。

下面从施肥量和灌溉率两方面来分析农业生产条件对农田碳截获能力的影响。图4为化肥施用量和碳截获量的相关性,从图中可以看到施肥量和碳截获量的R²达0.873。两者具有很好的相关性,即随着施肥量的增加单位面积农田内碳截获量也处于增加的趋势。不仅化肥施用量对农田碳截获能力有一定的影响,而且农田灌溉等多种农业生产条件均会直接或间接影响到农田的碳截获能力。图5为碳截获量与灌溉率的变化情况,其中灌溉率(有效灌溉面积/耕地总面积)采用袁再建(2010)^[27]的数据,碳截获量数据均为约5 a的平均值,从图中可以看到两者具有相似的变化趋势。由于灌溉率的提高增加了农作物的生物产量,而且生物量与碳截获量具有很好的一致性,因此可以说20多a间冀中南地区农田的灌溉率迅速增长推动了碳截获能力是不断上升。

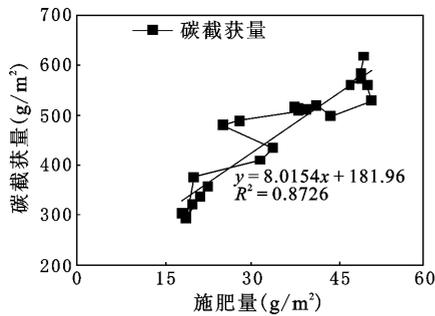


图4 碳截获量与施肥量的相关性

Fig.4 The relationship between carbon capture amount and fertilizer

虽然各地区的农田碳截获能力均受多个因素的影响,但是不同地区间各因素的影响程度不同。为了分析各因素对碳截获能力影响的的空间差异性,本文从地下水灌溉为主的地区和雨养为主的低产田中分别选取典型地区,即栾城县、深州市和南皮县,然后从有效灌溉量、降水和化肥施用量上进行对比和讨论。

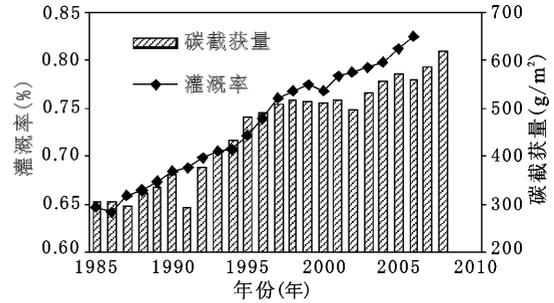


图5 碳截获量与灌溉率的变化

Fig.5 The change of carbon capture amount and irrigation coverage

图6中粮食产量数据以及化肥施用量数据来源于1984~2008年的河北省经济统计年鉴和河北省农村统计年鉴,降水和灌溉率引自袁再健(2010)的研究结果^[27]。从图6可以发现,20多a以来各县的农作物碳截获总量有了显著的增长,而且栾城县远远高于其他地区。与此同时,施肥量和灌溉率也出现上升的趋势,而降水波动性比较大。栾城县作为一个传统的农业县,无论是灌溉还是施肥量均是比较高的,避免了降水的不均与不足而带来的负面影响,最终使农田碳截获量稳步上升。虽然深州市的化肥施用量不断增加,但是受外来水的限制,农田的截获量并没有太大的提高。直到2002年以后,由于水利条件的改善以及化肥施用量的持续增加,深州市农田碳截获能力增长迅速。南皮县浅层地下水为微咸水,对农作物生长产生不利的影响,因此南皮县农田碳截获量比较低而且增长缓慢。但是近年来一些减盐等农业技术的实施对这种瓶颈有所缓和。由此可以看出,灌溉率和施肥量对农田的碳截获能力具有重要影响。尤其是在冀中南地区降水并不稳定,很难保证农作物保产、增产的需要,所以灌溉条件正是对农业发展的重要保障之一。

综上所述,高产田在化肥和水的充足供应下,碳截获能力比较高。对于水质较差的低产田来讲,降水和肥料是影响粮食产量和农田碳截获能力的重要因素。而对于以引用外来水或污灌的地区,只有提高灌溉效率和污水处理水平,才能达到粮食增产、保产以及提高碳截获能力。因此,水资源对农业发展有着重要的意义,只有合理利用水资源,才能从容应对粮食安全问题和提高农田的碳截获能力。然而近年来研究发现,华北地区浅层地下水水位出现下降的趋势,进而引发了地面塌陷、土壤次生盐渍化等问题^[28-30],由此未来水资源

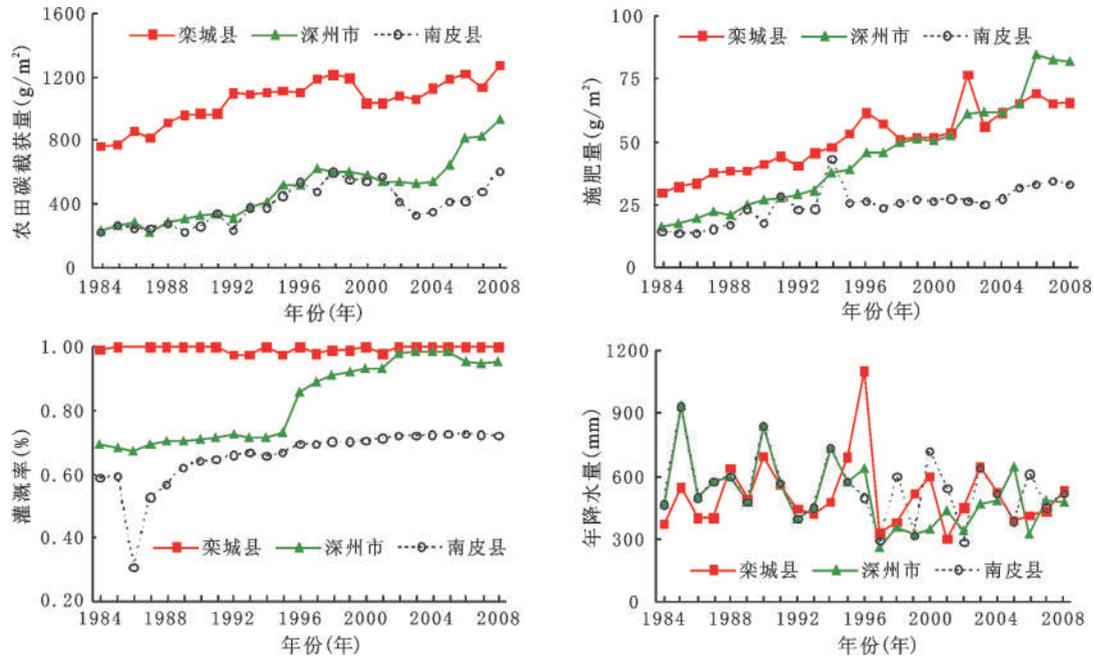


图6 栾城县、深州市、南皮县农业条件对比

Fig. 6 Comparison of agricultural conditions in Luancheng County, Shenzhou County, and NanPi County

短缺势必对粮食安全和农田碳截获能力带来挑战。

3 结论与讨论

自20世纪80年代以来,在人类活动及水肥条件的驱使下,冀中南地区农田的碳截获能力增加了近 300 g/m^2 ,2008年农田碳截获总量达到 0.025 Pg 。而且,山前平原地区比低平原区具有更高的碳截获水平,这与陈福军^[1]的研究结果比较接近。20多a以来,山前平原地区农田的碳截获能力出现先增长后下降的趋势。

农田内碳截获能力的增加或减少正反映了其碳转换率的状况,所以冀中南地区农田碳截获能力的增加,加速了碳循环和碳汇的过程。另一方面,农田碳截获总量很大,虽然只是动态的碳库,但是如果能够合理利用必将增加农田的实际固碳能力。

由于本文只是对农田碳截获量的粗略估算,收获指数、根冠比和农作物含碳量均采取比较保守的数值会对农田的碳截获能力产生一定的影响,在以后的研究中将进一步提高计算精度。

参考文献:

[1] Piao S L, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, **458**: 1009-1013.
 [2] Fan S, Gloor M, Mahlman J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic car-

bon dioxide data and models[J]. *Science*, 1998, **282**: 442-446.

- [3] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, **292**: 2320-2322.
 [4] 唐国平,李秀彬,Fischer G,等.气候变化对中国农业生产的影响[J].*地理学报*,2000,**55**(2):129~138.
 [5] 殷培红,方修琦,张学珍,等.中国粮食单产对气候变化的敏感性评价[J].*地理学报*,2010,**65**(5):515~524.
 [6] 姚凤梅.气候变化对我国粮食产量的影响评价[D].北京:中国科学院研究生院,2005.
 [7] 刘彦随,刘玉,郭丽英.气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J].*中国生态农业学报*,2010,**18**(4):905~910.
 [8] 李伟君,王春乙.气候变化对我国农作物种植结构的影响[J].*气候变化研究进展*,2010,**6**(2):123~129.
 [9] 刘颖杰,林而达.气候变暖对中国不同地区农业的影响[J].*气候变化研究进展*,2007,**3**(4):229~233.
 [10] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴1985[M].北京:中国统计出版社,1985.
 [11] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴2009[M].北京:中国统计出版社,2009.
 [12] 河北省统计局.河北经济统计年鉴2009[M].北京:中国统计出版社,2009.
 [13] 俞海,黄季焜,Scott R,等.中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J].*地理研究*,2003,**22**(3):380~388.
 [14] 曾江海,王智平,胡春胜,等.华北半湿润区土壤有机质分解与积累特征[J].*土壤肥料*,1996,(4):1~4.
 [15] 朱安宁,张佳宝,杨劲松,等.集约化种植条件下典型潮土区土壤有机质的演变特征[J].*土壤通报*,2010,**41**(3):532~536.
 [16] 薛玲.基于NDVI遥感数据的华北平原作物蒸散量、产量时

- 空分布研究(1981~2001)[D].北京:中国农业大学,2004.
- [17] 张福春,朱志辉.中国作物的收获指数[J].中国农业科学,1990,**23**(2):83~87.
- [18] 袁葵洲,官春云.影响油菜收获指数的几个生理因子[J].作物学报,1997,**23**(5):580~586.
- [19] 袁葵洲,官春云,廖爱玲.油菜收获指数对经济产量的贡献[J].湖南师范大学自然科学学报,1999,**22**(1):65~69.
- [20] 田伟华,徐克章,郇 鑫,等.吉林省不同年代育成大豆品种某些农艺性状的变化[J].中国油料作物学报,2007,**29**(4):397~401.
- [21] 张喜英.作物根系与土壤水利用[M].北京:气象出版社,1999:38~51.
- [22] 河北省统计局.河北经济统计年鉴1986[M].北京:中国统计出版社,1986.
- [23] Shi Y S, Xiao J Y, Shen Y J. Landscape pattern change and its implications in Hai River Basin, China[C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, ISPRS Congress. Vol. XXXV II. Beijing, 2008: 569-574.
- [24] Xiao J Y, Shen Y J, Ge J F, et al. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing[J]. Landscape and Urban Planning, 2006,(75): 69-80.
- [25] 肖捷颖,葛京凤,沈彦俊,等.基于GIS的石家庄市城市土地利用扩展分析[J].地理研究,2003,**22**(6):789~798.
- [26] 肖捷颖,葛京凤,沈彦俊,等.基于TM和ETM+遥感分析的石家庄市土地利用/覆被变化研究[J].地理科学,2005,**25**(4):495~500.
- [27] 袁再健.海河流域典型农田能量与CO₂通量及农业耗水研究[R].石家庄:中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,2010.
- [28] 张永强,刘昌明,沈彦俊.太行山山前平原浅层地下水位动态分析[J].中国生态农业学报,2001,**9**(2):38~40.
- [29] 沈彦俊,宋献方,肖捷颖,等.石家庄地区近70年来伴随经济发展的水文环境变化分析[J].自然资源学报,2007,**22**(1):51~61.
- [30] 夏 军,刘孟雨,贾绍凤,等.华北地区水资源及水安全问题的思考与研究[J].自然资源学报,2004,**19**(5):550~560.
- [31] 陈福军,沈彦俊,李 倩,等.中国陆地生态系统近30年NPP时空变化研究[J].地理科学,2011,**31**(11):1409~1414.

Spatial-temporal Change of Biological Productivity and Carbon Capture Capability in the Mid-south of Hebei Province

HU Qiao-li^{1,2}, SHEN Yan-jun¹, CHEN Fu-jun², QI Yong-qing¹, ZHANG Yu-cui¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 0500201, China; 2. College of Resources and Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China)

Abstract: Based on six period of land-use data (1985, 1990, 1995, 2000, 2005 and 2008) and grain yield data (1984-2008), biological productivity and carbon capture capability of crops in the mid-south parts of Hebei Province were estimated. Meanwhile, the spatial-temporal change of biomass and carbon capture capability were analyzed. The result showed that: biological productivity and carbon capture capability appeared increasing trend from 1980s. The total biomass and carbon capture reached 0.065 Pg and 0.025 Pg, respectively. Moreover, crops capture capability showed spatial variability. Biological productivity and carbon capture capabilities in the piedmont farmland are much larger than the western mountains and lower plains areas. On the other hand, with the increase of biological productivity and carbon capture capabilities, the carbon cycle and sequestration process were accelerated. Though the farmland is only a dynamic carbon pool, by the large quantity of carbon capture, the carbon sequestration capacity will increase with the reasonable use.

Key words: grain; carbon sequestration; biomass; harvest index