

A Study of the Impact on Soybean Potential under Climate Change

Qiuying Ding¹, Zhan Tian^{1,2}, Dongli Fan¹, Laixiang Sun^{2,3}, Guenther Fischer⁴

¹Shanghai institute of technology, Shanghai 21400, China

²Shanghai climate center, Shanghai meteorological bureau, Shanghai 21400, 20030, China

³Department of Geographic Sciences, University of Maryland, College Park 20742, USA

⁴International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg 2361, Austria

Received 31 July 2016

Accepted 25 March 2016

Abstract

Soybean is one of the important oil crops in China. However the supply and demand of soybean is at stake currently. The demand keeps increasing and the self-sufficient keeps decreasing. More seriously, climate change will bring obvious impact on the growth and development, planting pattern, planting area, potential production of soybean, etc. Therefore, assessment of the impact of soybean production under climate change is quite essential for improving the self-sufficient and guaranteeing the safety of oil crops. This study will extend and improve the parameters of soybean in agricultural ecology zone (AEZ) based on the 22 soybean observation stations in the major planting area from 1981-2011 to achieve China-AEZ. And then simulate the impact of climate change on soybean. The results show that: the simulation of China-AEZ has been improved a lot. In 2050s, the total soybean potential will increased by 7123 thousand tons. The total suitable planting area will increased by 3589 thousand hectare. But the average potential will decreased by 55 kg/ha. From the spatial scale, the soybean potential will increase in Northeast China and Northwest China. Soybean potential will decrease in the other area of China under climate change.

Keywords: Soybean, Climate change, AEZ, Production potential

气候变化对我国大豆生产潜力的影响研究

丁秋莹¹, 田展^{1,2}, 樊冬丽¹, 孙来祥^{2,3}, Guenther Fischer⁴

¹上海应用技术学院, 上海 21400, 中国

²上海气象局上海市气候中心, 上海 20030, 中国

³马里兰大学帕克分校地理科学系, 大学公园市 20742, 马里兰州, 美国

⁴国际应用系统研究所, 拉克森堡 2361, 奥地利

摘要: 大豆是我国主要的油料作物之一。然而, 目前我国大豆供给形势不容乐观。一方面需求增加, 自给率较低; 另一方面, 气候变化将会影响我国大豆生长发育、种植模式、种植布局、生产潜力等, 因此客观准确地评价气候变化对我国大豆生产的影响为提高我国大豆自给率、保障油料安全具有重大意义。本研究基于 1981-2011 年我国大豆主产区的 22 个农业气象站点观测数据, 扩充并改进 AEZ(Agricultural Ecology Zone) 大豆的品种库参数, 利用 AEZ 模型模拟了未来气候变化对我国大豆生产潜力的影响。结果显示: 调整改进后的 China-AEZ 模型对我国大豆主产区的区域模拟能力得到了较大的提高。总体来看, 气候变化影响下, 到 2050s 我国大豆总生产潜力将会比 1990s 增加 7123 千吨, 约为 4.15%。大豆总适宜面积增加 3589 千公顷, 约为 6.15%。平均单产生产潜力减少 55kg/ha, 约为 1.89%。区域上来看, 气候变化将会引起东北以及西北地区大豆生产潜力增加, 但其他区域均小幅减产。

关键词: 大豆; 气候变化; AEZ; 生产潜力

添加: 国家自然科学基金 (41371110, 4167113 和 41601049) 和中国气象局气候变化专项 (CCSF2011330、CCSF201110) 资助。

我国油脂资源短缺，食用油供给形势严峻，油料长期存在着严重的供需矛盾。其中大豆是一种很有价值的油料作物，是重要的畜饲料，生物燃料，蛋白质等来源^[1]，随着过去几十年间我国经济发展以及人们生活水平的改善，大豆需求量显著增加，并且预计这种增长趋势在未来还会持续^[2]。然而多年来我国油料作物生产潜力徘徊不前，大豆生产潜力也连续走低^[3]。2003年开始，我国进口大豆数量首次超过国产大豆。未来气候变化将会严重影响我国大豆生产，进一步加大大豆生产的不稳定性，供需矛盾还将进一步加剧。因此明确气候变化对大豆生产的影响，对保障国家食用油供给安全具有实际的重要意义。

过去短时期内全球气候发生了迅速变暖，我国年平均地表大气温度在过去50年内升高了1.1℃^[4]，这一增幅要高于全球地表平均温度变化。全国平均降水总量变化不显著，年代际波动较大，降水趋于集中，全国平均暴雨和极端强降水事件的频率和强度都有所增长^[5,6]。并且气候变暖会增加蒸散^[7]，干旱发生的频率和强度都会加强^[8]。此外，随着全球变暖，异常偏冷性事件减少减轻；而异常偏暖性极端事件增多增强；气候暖干化趋势会加重病害的发生^[9]。近年来极端气候事件发生的形式也更加多样性^[10]。气候变化势必会给农业生产带来严重影响。干旱、极端天气等增加了农业生产的风险，也将加大大豆生产潜力的波动性。气候变暖影响下，东北地区作物生育期延长，作物种植边界北扩，能够促进大豆的种植边界北移，有利于扩大高纬度地区大豆的种植面积^[11]。

从目前相关研究来看，作物模拟模型是一种较为系统综合的分析方法，能够综合评估农业系统与土壤、气候等因子之间的相互作用。随着科学技术的发展进步和消费需求的增加，作物模型无论在研究深度还是应用广度上都取得了显著的成就。AEZ模型是一种空间尺度的土地生产潜力评估模型，该模型在模拟作物生产潜力时，采用的自动匹配算法能够依据气候资源数据和LUT（土地利用单元）属性数据逐格点尝试所有可能性，因此模型能够自动筛选出最优的作物种植品种、种植模式等，这使得AEZ模型在区域作物潜在生产力评估中具有明显优势。

本研究基于我国多年大豆观测数据通过改进模型的品种库参数以及算法，建立适合我国大豆评估的AEZ-China模型，评估1990s（1981-2010）baseline条件下与2050s(2041-2070)未来气候变化下大豆生产潜力。

1. 研究资料与方法

1.1. 研究资料

土壤数据是从HWSD（Harmonized World Soil Database）土壤数据库中提取而来，该数据库提供全球范围内1km×1km分辨率格网水平的土壤信息，土壤数据分为顶层（0-30cm）和下层（30-100cm），土壤属性包括排水速率、土壤深度、容积密度、有机碳有机质含量、土壤PH以及阳离子交换量等数据信息，可以供模型直接提取使用。

基准条件下的逐日气候观测数据来自国家气候中心，全国共设有743个气象站点，主要的气象要素包括逐日最低气温、最高气温、降水、日照时数、相对湿度以及风速，本研究选用1981-2010的气候数据作为基准时段。未来气候变化数据是对未来温室气体排放的不同情景进行的假设，已有研究表明IPCC AR4气候模式结果对东亚和中国的气候变化具有较好的模拟能力^[12]，设计了多种排放情景，对比研究表明，近年来温室气体增长率与SRES A1B情景下的温室气体排放水平最为接近，能够一定程度上代表未来气候发展的方向，因此本研究中采用A1B排放情景作为未来气候变化的趋势。

表1的大豆观测数据来自中国气象局信息中心多年观测整理所得，涵盖了全国主要大豆种植省份。根据站点记录数据的完整性以及地理位置分布，从中国气象局提供的数据中挑选22个大豆站点，数据年份包括1981-2011年，数据内容包括：站点基本信息（站点名称、经纬度、海拔高度），栽培信息（种植品种、熟性、耕作方式等），生长发育的详细信息（播种、出苗、开花、成熟等），生产潜力及相关信息（种植密度、粒重、总生产潜力、茎秆重等）以及主要的管理措施（施肥、灌溉、收获等）。该表中的生产潜力是根据站点历年的纪录数据，剔除个别存在病虫害年份以及奇高的产量，奇高生

表 1. 大豆观测站点基本信息

省份	站点	经度	纬度	生产潜力 (kg/ha)	生育期 (天)
黑龙江	德都	127.35	46.08	4959	134
黑龙江	巴彦	126.15	48.47	5448	137
黑龙江	嫩江	125.23	49.17	4234	145
辽宁	阜新	121.72	42.08	3243	134
辽宁	盖州	122.35	40.42	4216	131
辽宁	海城	122.72	40.88	4124	135
吉林	辽源	125.08	42.92	4067	143
内蒙古	扎兰屯	122.73	48.00	4946	135
陕西	绥德	110.22	37.50	2499	166
陕西	延安	109.50	36.60	4088	154
新疆	莎车	77.10	38.43	3711	143
河北	黄骅	117.35	38.37	4692	95
河南	国营	114.40	33.75	4071	117
山东	莒县	118.83	35.58	3015	89
江苏	丰县	116.58	34.68	3729	103
江苏	盱眙	118.02	33.00	3445	106
安徽	蒙城	116.53	33.28	4132	100
安徽	寿县	116.78	32.55	2345	103
江西	龙南	114.82	24.92	3009	102
江西	南康	114.75	25.67	2872	96
江西	泰和	114.92	26.80	3045	95
湖南	怀化	107.97	27.55	2820	101

产潜力可能是存在记录误差，个别年份的记录生产潜力在 8000kg/ha，根据查阅到的大豆最高生产潜力在 6000 kg/ha 左右。然后从剩余观测年份中挑选中值作为每个站点大豆观测生产潜力。从观测数据来看，东北地区特别是黑龙江省大豆产量较高，在 4000kg/ha 以上，而南方大部分地区包括江苏、安徽、江西的大部分观测站点大豆产量较低，在 3000kg/ha 左右。生育期长度呈现北长南短的分布规律。在灌溉方式上，观测数据中扎兰屯、蒙城、莎车站点有

灌溉纪录，其他多数站点为雨养种植模式。

1.2. 研究方法

AEZ模型同时考虑光、温、水、土、投入水平等影响生物生产潜力形成的因素及指标。该模型能够进行土地适宜性以及土地生产潜力评价，能够得到农业生态区划图、土地适宜性评价图以及农作物生产潜力等信息，为气候变化、土地承载力等研究提供了依据。根据假定的投入水平、灌溉供给以及管

理条件, 定义特定作物在气候、土壤、地形以及海拔因素引起的限制因子, 以此计算得到作物的最大生产潜力和生产潜力。以土地利用单元 (LUT) 作为计算潜在生产力的基本单位, 每一种土地利用单元包含的信息有: 收获系数、最大叶面积指数、最大光合速率等, 耕作方式和投入需求, 作物残茬和作物副产品系数。采用的自动匹配算法会依据气候资源数据和LUT属性数据逐格点尝试所有可能性, 因此模型能够自动筛选出最优的作物种植品种、种植模式等, 这使得AEZ模型在区域作物潜在生产潜力评估中具有明显优势, 主要步骤是:

(1) 通过气候和土地资源的清查, 建立起研究区域内逐格点中每个评价单元的气候 (温度、降水、风速、日照时数、相对湿度)、土壤、地形等资源数据库, 同时定量评估区域内农业气候资源, 包括积温、湿润指数等;

(2) 根据已有资源数据库及其他LUT属性信息, 进行作物与环境匹配, 计算所有作物每个LUT的光生产潜力, 以及在土壤、地形、水分、管理水平等

2. AEZ 模型的验证

根据大豆观测数据扩充 AEZ 模型的大豆品种库, 同时结合大豆的观测数据进行对比, 调整大品种系数。此外根据大豆的观测数据的空间分布, 基于生态系统类型调整 AEZ 模型的算法, 形成适应于我国大豆生产的 AEZ 模型版本。以此建立跨尺度模拟的中国大豆评估模型 China-AEZ^[14], 综合评估未来气候变化影响下我国大豆生产潜力的变化。

(1) AEZ 模型验证

在 AEZ 模型中, 生育期长度是品种的一个关键属性, 首先对比原 AEZ 模型得到的生育期分布图与实际观测值进行比较, 验证原始 AEZ 模型对我国大豆的模拟能力。在 AEZ 模型中, 生育期作为 LUT 的一个重要属性, 根据大豆普遍生育期长度, 以 15 天间隔分成几个代表性生育期。为更明显的比较观测值与 AEZ 模型模拟的结果, 将观测站点的品种生育期长度根据 AEZ 模型的品种库分为 4 类。从图 1 生育期长度的对比中, 我们可以看到两个主要的不同点:

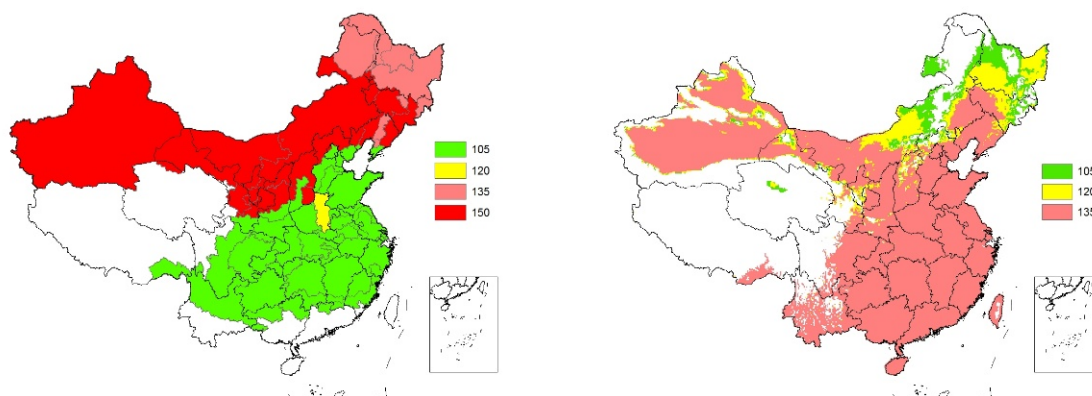


图 1. 1990s 下原大豆生育期长度分布实际情况 (左) 以及 AEZ 模型模拟情况 (右)

限制条件下的作物最高生产潜力;

(3) 计算由于其它限制因子导致的作物生产潜力损失, 如干旱、霜冻、作物病虫害等, 并进一步考虑土壤与地形因素对作物最终潜在生产潜力的影响。在模拟我国小麦生产潜力中已得到应用^[13]。但该模型对农作物生长过程的机理性解释相对而言较为粗略, 作物生长的微观基础比较薄弱。

1) 观测站点中存在 150 天生育期的品种, 而在原始 AEZ 模型的品种库中仅有其他三种类型 (105 天, 120 天, 135 天) 的生育期长度的品种; 2) 原始 AEZ 模型模拟的结果显示在南方、华北大部分地区选择生育期较长的品种, 而在东北地区则选择了生育期较短的品种, 呈现为南长北短的趋势, 而实际观测结果与 AEZ 模型模拟的结果相反, 呈现南短

北长的趋势，这主要是因为 AEZ 模型是采用的自动算法，所考虑的因素主要是气候、土壤等客观因素的影响，没有考虑区域内复种指数、作物的轮作等种植者决定的主观因素，而在我国大部分地区，大豆并不是一种主作物，农民会优先种植小麦、水稻等收益较大的作物，从而导致大豆可种植的生育期就会缩短。

(2) AEZ 模型的调试

针对原始 AEZ 模型的不足，通过不断试验模拟，与观测值进行比较验证。本研究中我们做了两点主要的改进：1)在 AEZ 模型的品种库中增加生育期为 150 天的品种，并根据观测数据补充和改进 AEZ 模型的其他相关品种参数，包括收获系数、最大叶面积指数、积温等，使之与我国大豆种植生长发育情

况更为吻合。从表 2 中改进的品种参数结果来看，原有品种收获系数和最大叶面积指数整体上增加，可增加模拟的生产潜力；适宜最低积温降低、适宜最高积温提高，扩大大豆生长发育对温度的要求范围，使之适宜于我国南方热量资源丰富的地区。

AEZ 模型能够根据气候、土壤资源生成八种不同的耕作系统类型，通过比较观测值与耕作系统的关系，发现大豆生育期长度与耕作系统分布之间存在一定的相关性，即在单作区内大豆观测生育期长度较长而在多熟区内大豆生育期较短。基于作物耕作系统调整 AEZ 模型的自动算法，使其在一个耕作系统内根据限制品种的选择，一种作物耕作系统内选择特定的品种，代替原有的完全最优自动算法。

根据表 3 进行品种选择：其中单作区内大豆生

表 2. AEZ 模型中大豆品种及主要品种参数变化对比（原：原 AEZ 模型；改：改进后的 AEZ 模型）

品种	生育期长度	收获系数	最大叶面积指数	适宜生育期最低积温	次适宜生育期最低积温	适宜生育期最高积温	次适宜生育期最高积温
温带和亚热带大豆 1 (原)	105	0.3	4.0	2200	1850	2600	3150
温带和亚热带大豆 1 (改)	105	0.38	4.0	2100	1850	2800	3150
温带和亚热带大豆 2 (原)	120	0.35	2.5	2400	2000	3000	3600
温带和亚热带大豆 2 (改)	120	0.37	4.2	2300	2000	3150	3500
温带和亚热带大豆 3 (原)	135	0.35	3.0	2600	2150	3400	4050
温带和亚热带大豆 3 (改)	135	0.36	4.5	2500	2150	3450	3800
温带和亚热带大豆 4 (增)	150	0.35	4.5	2700	2300	3750	4100

表 3. AEZ 模型不同耕作系统品种的选择

耕作系统类型	生育期长度类型的选择
No cropping	从四种类型中选择最优生育期
Single cropping	
Limited cropping	
Double cropping	从 105 天或 120 天选择较优生育期
Double cropping with rice	
Double rice cropping	选择 105 天生育期长度
Triple cropping	
Triple rice cropping	

育期长度的选择不受限制，模型根据大豆最大生产潜力选择品种类型，一般情况下，在气候资源丰富的条件下，作物生产潜力与生育期长度之间有一定的相关性，优先选择生育期长的品种；在两熟区，大豆生育期长度的选择受轮作影响，限定在 105 天和 120 天之间选择；在三熟区，大豆生育期的选择更短，仅限定在 105 天。

3. 结果分析

3.1. 大豆生产潜力模拟评估

我国大豆种植方式以雨养为主，因此本研究主要评估雨养条件下大豆生产潜力和适宜区划。基准气候条件下，AEZ 模拟得到的我国大豆主产区集中在东北平原、华北平原、长江中下游平原以及四川盆地等地势较为平坦的地区。模型模拟的结果与我国大豆主产区有很好的一致性，历史相关资料表明我国大豆主产区包括北方春大豆（包括东北地区、黄土高原、西北地区）、黄淮海夏大豆（包括晋冀中部、黄淮海流域）、长江流域春夏大豆（包括长江流域、云贵高原）、东南春夏秋大豆（浙江、福建、江西、台湾、湖南、广东、广西大部）以及华南四季大豆（广东、广西、云南和福建南部）。图 2 模拟 1990s 大豆生产潜力分布：其中大豆生产潜力最大的区域位于东北省境内，很多区域在 4000kg/ha 以上，这与该区属于一熟制，大豆生育期较长有关，模拟的大豆生产潜力与观测的大豆生产潜力较为相近，特别是黑龙江省的德都、巴彦站点附近区域大豆生产潜力处于极高水平；华北平原的山东、河北、河南部分区域大豆生产潜力接近 4000kg/ha，而实际观测中河北的黄骅、河南的国营大豆生产潜力也高于 4000kg/ha；虽然南方水热资源丰富，但改进后的 AEZ 模型对品种的选择受区域内熟制分布的限制，考虑多熟制轮作的影响，因而不能充分利用气候资源，大豆生产潜力不如东北地区高，在 3000kg/ha 左右，与观测的站点（安徽的蒙城、寿县，江西的龙南、南康、泰和以及湖北的怀化）的大豆生产潜力相近。以上结果表明改进后的 AEZ 模型模拟得到的大豆生产潜力空间分布能够较好的反映我国观测种植大豆生产潜力情况，AEZ 对我国大豆生产具有较

好的模拟能力。

图 3 结果表明：到 2050s 未来气候变化下，在使用最优播期和限制性的适宜品种的情况下，总体上气候变化对大豆生产的影响呈现北增南减的趋势，东北以及华北部分地区受全球变暖的影响，冻害、大雪等低温灾害发生频率减少，有相当一部分地区大豆增产 500kg/ha 以上，且黑龙江、内蒙古以及河北省部分地区增产幅度在 1000kg/ha，仅有黑龙江西部以及辽宁中部地区有小幅减产，均少于 250 kg/ha；华北、华中南部以及南方大部分地区呈现减产趋势，主要原因是华北地区处于熟制交界地带，气候变暖下该区熟制增加，缩短了大豆适宜生育期长度的选择，导致大豆减产；而华中南部以及南方地区可能是由于该区热量资源本身较为丰富，加上气候变暖，高温热浪的灾害增加，不利于作物生长，导致大豆生育期缩短，从而导致大豆减产，但是大部分地区减产幅度较小，均低于 500 kg/ha；山东、河北、河南以及安徽、江苏北部等处于熟制过度地带，大豆生育期长度变化较大，大豆减产趋势较为明显，高于 500 kg/ha。

3.2. 大豆适应种植区域分析

表 4 结果显示，气候变化影响下，我国大豆适宜种植面积增加 3589 千公顷，总产量增加 7123 千吨，但是大豆单位面积产量减少 55kg/ha。

AEZ 模型将我国分为华北、东北、华东、华中、东南、西南、西藏高原、西北八个区域统计分析，其中华北地区包括北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省和湖北省，东北地区包括辽宁省、吉林省和黑龙江省，华东地区包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省，华中地区包括江西省和湖南省，东南地区包括福建省、广东省、广西省和海南省，西南地区包括重庆市、四川省、贵州省和云南省，高原地区包括西藏自治区和青海省，西北地区包括新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、陕西省、甘肃省和宁夏回族自治区。

在使用了最优播期和最优限制性品种选择计算得到的大豆生产潜力中，表 5 统计结果显示，雨养条件下，大豆主产区集中在华北、东北、西南和西北地区，1990s 以上地区大豆产量占大豆总产的

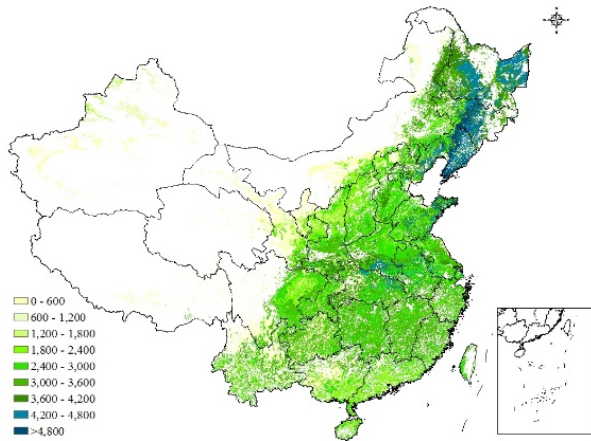


图 2. 1990s 大豆生产潜力模拟

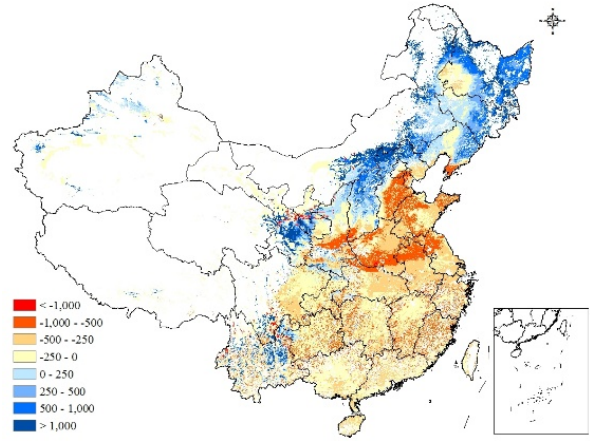


图 3. 2050s 大豆生产潜力的变化 (kg/ha) .

表 4. 大豆生产总体统计结果

时间	适宜面积 (千公顷)	总产 (千吨)	单产 (kg/ha)
1990s	58332	171616	2942
2050s	61921	178739	2887

表 5. 大豆生产分区域统计结果

区域	适宜面积 (千公顷)		总产 (千吨)		单产 (kg/ha)	
	1990s	2050s	1990s	2050s	1990s	2050s
华北	12645	13029	35337	33984	3105	2898
东北	15461	15538	57274	63526	4116	4543
华东	4250	4271	11981	10335	3133	2689
华中	2253	2253	6146	5556	3031	2739
华南	4074	4138	9628	8615	2626	2313
西南	11253	12260	29646	28687	2927	2600
青藏高原	40	125	93	278	2561	2472
西北	8356	10307	21511	27758	2860	2993

71.2%。1990s 下，华北和东北地区是大豆总生产潜力最高的地区，占总生产潜力的 52.3%，气候变化影响下大豆总产有小幅增加，为 7123 千吨，除西北和东北两个地区，其他地区大豆总生产潜力均有减少。适宜面积增加 3589 千公顷，增加明显的地区为华北、西南和西北地区，该区位于高纬度地区和山区，主要驱动因素可能是气候变暖影响下，该区热量资源增加。从平均生产潜力来看，1990s 下大豆均产最高的地区位于东北，平均生产潜力高于 4000kg/ha，其他地区在 3000kg/ha 左右，气候变化下大豆总体平均生产潜力降低 55 kg/ha，除东北和西北地区大豆均产

有增加外，其他地区大豆均有小幅减产。

4. 结论及讨论

本研究基于大豆观测值对 AEZ 模型的大豆品种库参数进行有效的扩充和改进，改进后的 AEZ 模型能够更为准确地模拟我国大豆生产潜力及种植区划。未来气候变化下，总体来看气候变化有利于东北、西北以及华北北部地区大豆生产，但不利于华北大部、南方大部分大豆生产。统计结果显示大豆总产和总适宜

面积增加，平均生产潜力减少。区域上来看，气候变化下带来的热量资源增加有利于东北及西北地区大豆生产，华北以及南方大部分地区均有小幅减产。

虽然本研究中 AEZ 模型对大豆遗传参数进行了调整改进，但对适宜播期的模拟仍然是采用最优播期，并未考虑多熟制内其他主作物对大豆种植播期的限制，今后还需进一步探讨多熟制内的作物轮作模式，以期得到更为准确的结果。

参考文献

[1]Masuda T, Goldsmith P D. *World Soybean Demand: An Elasticity Analysis and Long-Term Projections*. National Soybean Research Laboratory University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2009.
 [2]Masuda T, Goldsmith P D. World soybean production: area harvested, yield, and long-term projections. *International Food and Agribusiness Management Review*, 2009, 12(4): 143-162.

- [3]李秀娟, 刘喜元, 李晓伟, 等. 2009年呼伦贝尔市岭东地区大豆生产的气象条件分析. *现代农业科技*, 2010, (20):297, 299.
- [4]DING Y H, REN G Y, ZHAO Z, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6):954-971.
- [5]任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. *气候与环境研究*, 2010, 15(4):337-353.
- [6]王会军, 孙建奇, 祝亚丽. 中国极端气候及东亚地区能量和水分循环研究的若干近期进展. *自然杂志*, 2012, 34(1):10-17.
- [7]左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征. *水科学进展*, 2011, 22(4):455-461.
- [8]Gamble D W, Campbell D, Allen T L, et al. Climate Change, Drought, and Jamaican Agriculture: Local Knowledge and the Climate Record. *Annals of the Association of American Geographers*, 2010, 100(4):880-893.
- [9]王丽, 霍治国, 张蕾, 等. 气候变化对中国农作物病害发生的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(7):1673-1684.
- [10]Chen H, Zhang H, Xue C. *Chinese Extreme Climate Events and Agricultural Meteorological Services. Challenges and Opportunities in Agrometeorology*. Springer Berlin Heidelberg, 2011:435-459.
- [11]田展, 丁秋莹, 梁卓然, 等. 气候变化对中国油料作物的影响研究进展. *中国农学通报*, 2014, (15):1-6.
- [12]施小英, 徐祥德, 徐影. 中国 600 个站气温和 IPCC 模式产品气温的比较. *气象*, 2005, 31(7):49-53.
- [13]田展, 钟洪麟, 施润和, 等. Estimating potential yield of wheat production in China based on cross-scale data-model fusion. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(4): 364-372.
- [14]Fan D, Ding Q, Tian Z, et al. *Simulating the adaptive measures of soybean production to climate change in China: Based on cross-scale model coupling*. Emerging Economies, Risk and Development, and Intelligent Technology: Proceedings of the 5th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response, June 1-3, 2015, Tangier, Morocco. CRC Press, 2015: 143.