

1981—2015 年华北地区种植结构演变及其驱动机制分析

邹军 朱颖璇 杨雨豪 刘文胜 胡忆雨 陈阜 尹小刚*

(中国农业大学 农学院/农业农村部农作制度重点实验室,北京 100193)

摘要 为明确农业生产资料投入和作物受灾面积对作物产量的影响以及作物综合比较优势指数对华北地区种植结构演变的影响。本研究利用综合比较优势指数和线性回归等方法分析 1981—2015 年河北、河南和山东 3 个华北地区粮食主产省的作物生产、农业生产投入和作物受灾面积等变化特征。结果表明:1)1981—2015 年,华北地区玉米和花生种植面积均显著增加,大豆和棉花种植面积均显著减少,冬小麦和油菜种植面积保持相对稳定;冬小麦、玉米和花生总产量显著增加,大豆和棉花总产量显著下降;1981—2015 年所有作物单位面积产量均显著增加,其中冬小麦、玉米和花生单位面积产量增加速率较快,大豆和棉花单位面积产量增速较慢;2)1981—2015 年,华北地区氮肥、磷肥和钾肥等肥料投入和有效灌溉面积均显著增加,增长速率分别为 14.3 万 t/年、7.2 万 t/年、7.3 万 t/年和 12.2 万 hm²/年;3)旱灾是影响华北地区作物生产的主要自然灾害,1981—2015 年各省旱灾受灾面积显著减少;4)农业生产资料投入增加是作物单位面积产量提升的主要推动力,自然因素中旱灾是造成作物产量波动的主要因素,作物之间的比较优势是华北地区种植结构变化的主要驱动因子。

关键词 华北地区; 种植结构; 演变特征; 驱动因子; 比较优势

中图分类号 S344.9

文章编号 1007-4333(2019)12-0023-10

文献标志码 A

Analysis of planting structure evolution and its driving mechanism in North China from 1981 to 2015

Zou Jun, Zhu Yingxuan, Yang Yuhao, Liu Wensheng, Hu Yiyu, Chen Fu, Yin Xiaogang*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University/Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract To explore the impact of agricultural production materials inputs and agricultural disaster area on crop yield and the impact of crop comprehensive comparative advantage index on planting structure evolution in North China, the comprehensive comparative advantage index and linear regression method were adopted to analyze the changing characteristics of the crop production, agricultural production inputs and the agricultural disaster area in the 3 major grain producing provinces which were Hebei, Henan and Shandong province in North China from 1981 to 2015. The results showed that: 1) During 1981 and 2015, the planting areas of maize and peanut in North China increased significantly, soybean and cotton decreased significantly, and winter wheat and canola were relatively stable. The yield of winter wheat, maize and peanut showed an increasing trend, and the yield of soybean and cotton showed a downward trend. The per unit area yield of all crops increased significantly from 1981 to 2015, among which the per unit area yield of winter wheat, maize and peanut increased faster, and the per unit area yield of soybean and cotton increased slower; 2) During the same period, the nitrogen, phosphate and potash fertilizer inputs and effective irrigated area increased significantly in North China, with annual growth rates of 143 000 t, 72 000 t, 73 000 t and 122 000 hm², respectively;

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300201); 国家自然科学基金项目(31801316); 中央高校基本科研业务费(31051017)

第一作者: 邹军, 本科生, E-mail: zoujun2018@163.com

通讯作者: 尹小刚, 副教授, 主要从事农作制度与农田生态研究, E-mail: xiaogangyin@cau.edu.cn

3) Drought was the main agricultural disaster affecting crop production in North China, which decreased significantly from 1981 to 2015; 4) Increasing in investment in agricultural production materials was the main driving factor in crop yield improvement, agricultural disaster was the main factor causing crop yield fluctuations, and the comparative advantage between crops was the main driving factor for planting structure changes in North China.

Keywords North China; planting structure; evolutionary feature; driving factors; comparative advantage

华北地区作为我国重要的商品粮生产基地,是我国传统的小麦、玉米、大豆和棉花主产区。近几十年来随着农业科技进步、气候变化和市场驱动等多重因素的影响,华北地区的种植结构发生了显著变化。华北地区种植结构向着集约化和单一化发展,大量水肥投入获得高产的同时,也造成巨大的环境压力^[1-2]。此外,华北地区水资源匮乏,气候变化背景下自然灾害频繁发生也是影响华北地区作物生产的主要因素,单一化种植结构使得该地区对灾害的应对能力减弱。阐明华北地区种植结构的变化特征及其驱动因素,对于优化华北地区的种植结构,增强作物系统对自然灾害的适应能力具有重要意义。

优化华北地区种植结构是实现该地区农业可持续发展的重要途径,高明杰等^[3]从水资源约束角度探讨了华北地区种植结构优化途径,潘学鹏等^[4-6]和王红营等^[4-6]通过遥感分析了华北地区农作物时空变化特征以及农用地利用的时空变化特征,结果表明,2000—2013年华北地区粮食作物种植面积呈下降趋势,以果树、蔬菜为主的经济作物种植面积呈上升趋势,耕地面积减小、农村劳动力减少和粮食作物相较于瓜果蔬菜经济效益低是影响华北地区种植结构演变的主要原因。与此同时,大量小区试验研究阐明化肥等农业生产资料投入对作物生产的影响以及农业生产对华北地区地下水资源的影响,为该地区作物生产结构优化提供了技术支撑^[7-11]。

然而,区域种植结构的总体变化特征及农业生产资料投入和自然灾害对华北地区作物生产影响的研究尚未见报道。因此,本研究基于1981—2015年山东省、河南省和河北省华北地区3个主要产粮省作物生产数据、农业生产资料投入数据和灾害数据,利用综合比较优势指数和线性回归等方法分析1981—2015年华北地区种植结构演变特征,阐明农业生产资料投入和作物受灾面积对作物产量的影响,探讨该地区种植结构演变的驱动因素,旨在为进一步优化该地区种植结构提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

华北地区地处中纬度地带,包含北京市、河北省、天津市、河南省和山东省,属温带大陆性季风区,光热资源丰富, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 累积积温为4 100~5 400 $^{\circ}\text{C}/\text{年}$,年平均日照时数约为2 500 h;多年平均降雨约500 mm,其中70%以上集中在夏季^[12-13]。河南省、山东省和河北省是华北地区最主要的粮食主产省,农作物种植面积占华北地区农作物种植面积96%以上。冬小麦和玉米是华北地区最主要的粮食作物,大豆、棉花、花生和油菜是华北地区主要的经济作物。本研究的研究区域为河南省、山东省和河北省3个粮食主产省,见图1。

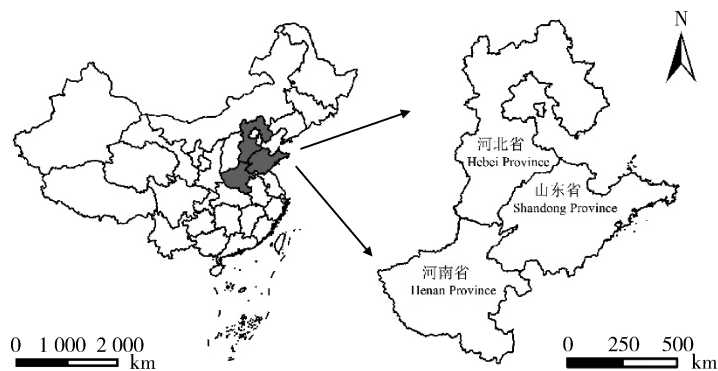


图1 华北地区粮食主产省空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of major grain producing provinces in North China

1.2 数据来源

1981—2015年河北、河南和山东3个省逐年干旱、涝灾和风暴灾数据,化肥施用量(折纯量)和有效灌溉面积等作物生产资料投入数据,以及作物种植面积、总产和单位面积产量等作物生产数据均来自于中国种植业信息网和国家统计局网站。氮肥、磷肥和钾肥施用量包含复合肥中氮磷钾的含量,复合肥氮磷钾折算比例参考史磊刚^[14]在华北地区的研究结果, $w(N) : w(P_2O_5) : w(K_2O)$ 为22 : 13 : 13。

1.3 数据分析方法

1.3.1 作物生产、农业生产资料投入和作物受灾面积变化趋势分析

利用线性回归分析法分析1981—2015年华北地区作物生产、农业生产资料投入和作物受灾面积随时间变化特征^[15]。

$$Y_i = a \times X_i + b \quad (1)$$

Y 代表作物种植面积(作物总产、作物单位面积产量、农业生产资料投入或作物受灾面积); X ,年; i 代表区域; a 为作物种植面积(作物总产、作物单位面积产量、农业生产资料投入或作物受灾面积)随时间变化趋势; b ,为常数项。利用皮尔逊相关系数检验作物种植面积(作物总产、作物单位面积产量、农业生产资料投入或作物受灾面积)随时间的变化趋势是否显著。

1.3.2 作物间的比较优势对华北地区种植结构的影响

利用综合比较优势指数分析华北地区1981—2015年主要作物的综合比较优势指数^[16]。

$$D_i = \sqrt{A_i \times B_i}; A_i = Y_i/Y; B_i = S_i/S \quad (2)$$

式中: D_i ,第*i*种作物综合比较优势指数; A_i ,第*i*种作物的产量比较优势指数; B_i ,第*i*种作物的规模比较优势指数; Y_i ,第*i*种作物单位面积产量,kg/hm²; Y ,华北地区主要作物平均单位面积产量,kg/hm²; S_i ,第*i*种作物的种植面积,万hm²; S ,华北地区主要作物种植总面积,万hm²。

1.3.3 农业生产资料投入和作物受灾面积对作物生产的影响

利用相关性分析研究农业生产资料投入和作物受灾面积对华北地区作物生产的影响。本研究所采用的数据均为省级的统计数据,无法将农业

生产资料投入、作物受灾面积等拆分到每个作物生产,因此将总体分析农业生产资料投入和作物受灾对华北地区总的作物生产的影响;灾害主要包含华北3省旱灾受灾面积、涝灾受灾面积和风暴灾受灾面积,农业生产资料投入主要包含氮肥、磷肥、钾肥施用量和有效灌溉面积,作物生产代表各省主要作物(冬小麦、玉米、大豆、花生、棉花和油菜)产量的总和。

本研究所有数据的运算和图表制作均使用Excel 2016完成,所有统计分析均使用SPSS 23.0完成,华北地区空间图采用ArcGIS 10.4.1绘制完成。

2 结果与分析

2.1 1981—2015年华北地区主要作物生产变化特征

2.1.1 主要作物种植面积变化特征

1981—2015年华北地区主要作物种植面积发生了显著变化,玉米和花生种植面积显著增加,大豆和棉花种植面积显著减少。冬小麦、玉米和花生是目前华北地区种植面积最大的3种作物(图2)。1981—2015年河南省冬小麦种植面积以3.2万hm²/年的速度显著增加,2015年河南省冬小麦种植面积约为490万hm²,河北和山东2个省冬小麦种植面积相对稳定,2015年这2个省冬小麦种植面积分别为230和380万hm²。1981—2015年河北、河南和山东3个省玉米种植面积均显著增加,其增长率分别为4.0、4.8和2.8万hm²/年,2015年华北3省玉米种植面积分别为325、334和317万hm²。1981—2015年3个省花生种植面积分别以0.4、2.8和0.4万hm²/年的速率显著增加,2015年华北3省的花生种植面积分别为34、108和74万hm²。1981—2015年3个省大豆种植面积分别以0.8、1.8和1.6万hm²/年的速率显著下降,2015年3个省的大豆种植面积分别为12.0、37.0和14.0万hm²。1981—2015年3个省棉花种植面积分别以1.1、1.7和2.2万hm²/年的速率显著下降,2015年3个省棉花种植面积分别为36、12和52万hm²。华北地区油菜种植主要集中在河南省;1981—2015年河南省油菜种植面积以0.6万hm²/年的速率显著增加,2015年河南省的油菜种植面积为34.8万hm²。

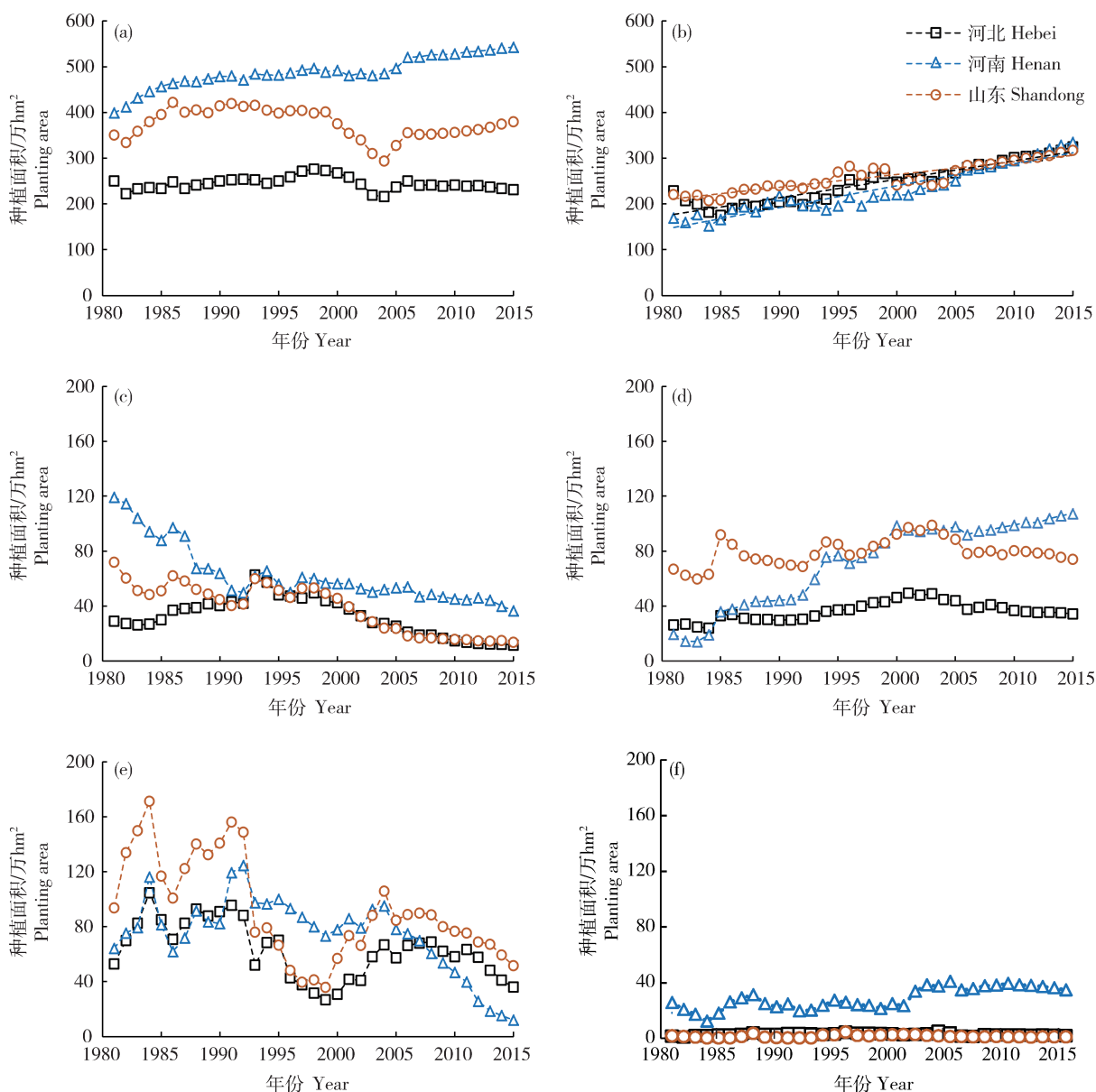


图2 1981—2015年河北、河南和山东3省冬小麦(a),玉米(b),大豆(c),花生(d),棉花(e)和油菜(f)种植面积变化特征

Fig. 2 Planting areas variation characteristics of winter wheat (a), maize (b), soybean (c), peanut (d), cotton (e) and canola (f) in Hebei, Henan and Shandong province from 1981 to 2015

2.1.2 主要作物总产变化特征

1981—2015年华北地区冬小麦、玉米、花生和油菜产量显著增加,大豆产量显著减少(图3)。1981—2015年河北、河南和山东3个省小麦产量增速分别为23、65和29万t/年,2015年3个省的冬小麦产量分别为1430、3500和2350万t。1981—2015年3个省玉米产量增速分别为32、41和36万t/年,2015年河北、河南和山东3个省的玉米产量分别为1670、1850和2050万t。1981—2015年

河北、河南和山东3个省大豆产量分别以0.5、1.0和1.7万t/年的速率减少,2015年河北、河南和山东3个省的大豆产量分别为23、50和35万t。1981—2015年3省花生产量增速分别为3.5、15.0和6.0万t/年,2015年3省的花生产量分别为127.0、485.0和319.0万t。1981—2015年河北省棉花产量以0.02万t/年的速率增加,河南省和山东省棉花产量分别以0.70和1.00万t/年的速率减少,2015年3个省的棉花平均产量分别为37.00、

13.00 和 54.00 万 t。1981—2015 年河南省油菜产量以 2.5 万 t/年的速率增加,河北和山东 2 省油菜

产量保持在较低水平,2015 年 3 个省油菜产量分别为 3.0、86.0 和 2.4 万 t。

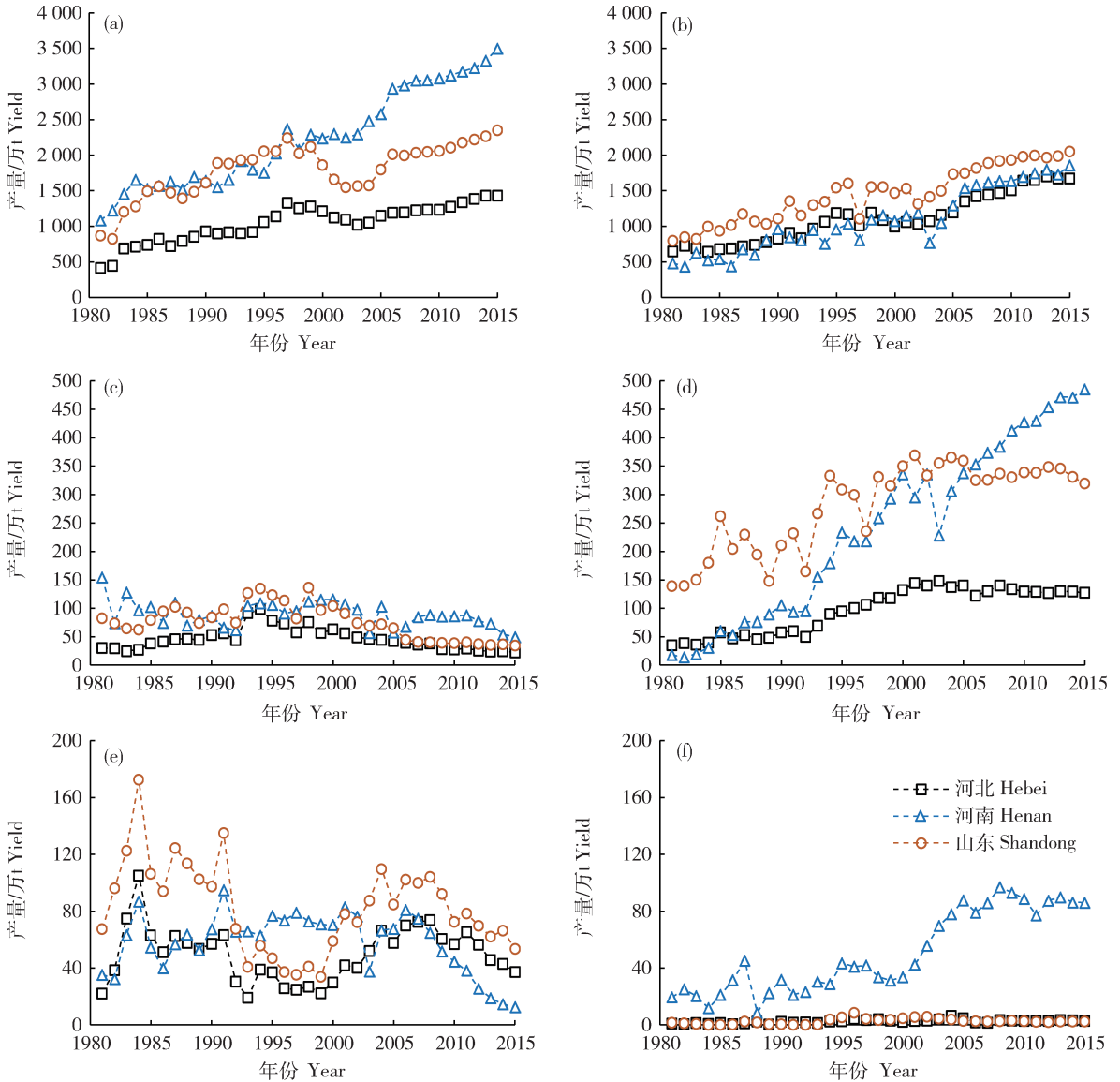


图 3 1981—2015 年河北、河南和山东 3 个省冬小麦 (a), 玉米 (b), 大豆 (c), 花生 (d), 棉花 (e) 和油菜 (f) 产量变化特征

Fig. 3 Yield variation characteristics of winter wheat (a), maize (b), soybean (c), peanut (d), cotton (e) and canola (f) in Hebei, Henan and Shandong province from 1981 to 2015

2.1.3 主要作物单位面积产量变化特征

1981—2015 年华北地区主要作物单位面积产量均显著增加,冬小麦、玉米和花生单位面积产量增速较快,大豆和棉花单位面积产量增速较慢;总体上,山东省各作物单位面积产量最高,河南省次之,河北省各作物单位面积产量水平相对较低(图 4)。1981—2015 年 3 个省冬小麦单位面积产量增速分

别为 100.0、104.0 和 95.0 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$,2015 年的冬小麦单位面积产量分别为 6 200、6 450 和 6 200 kg/hm^2 。1981—2015 年 3 个省玉米单位面积产量增速分别为 55、84 和 81 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$,2015 年的玉米单位面积产量分别为 5 100、5 500 和 6 500 kg/hm^2 。1981—2015 年 3 个省大豆单位面积产量增速分别为 31、21 和 39 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$,2015 年的大豆单位

面积产量分别为 1 950、1 360 和 2 540 kg/hm²。1981—2015 年 3 个省花生单位面积产量增速分别为 77、104 和 66 kg/(hm²·年),2015 年的花生单位面积产量分别为 3 700、4 500 和 4 300 kg/hm²。1981—2015 年 3 个省棉花单位面积产量增速分别

为 15、13 和 10 kg/(hm²·年),2015 年棉花单位面积产量分别 1 040、1 050 和 1 040 kg/hm²。1981—2015 年河北、河南和山东 3 个省油菜单面积产量增速分别为 35、50 和 49 kg/(hm²·年),2015 年油菜单面积产量分别为 1 700、2 500 和 2 600 kg/hm²。

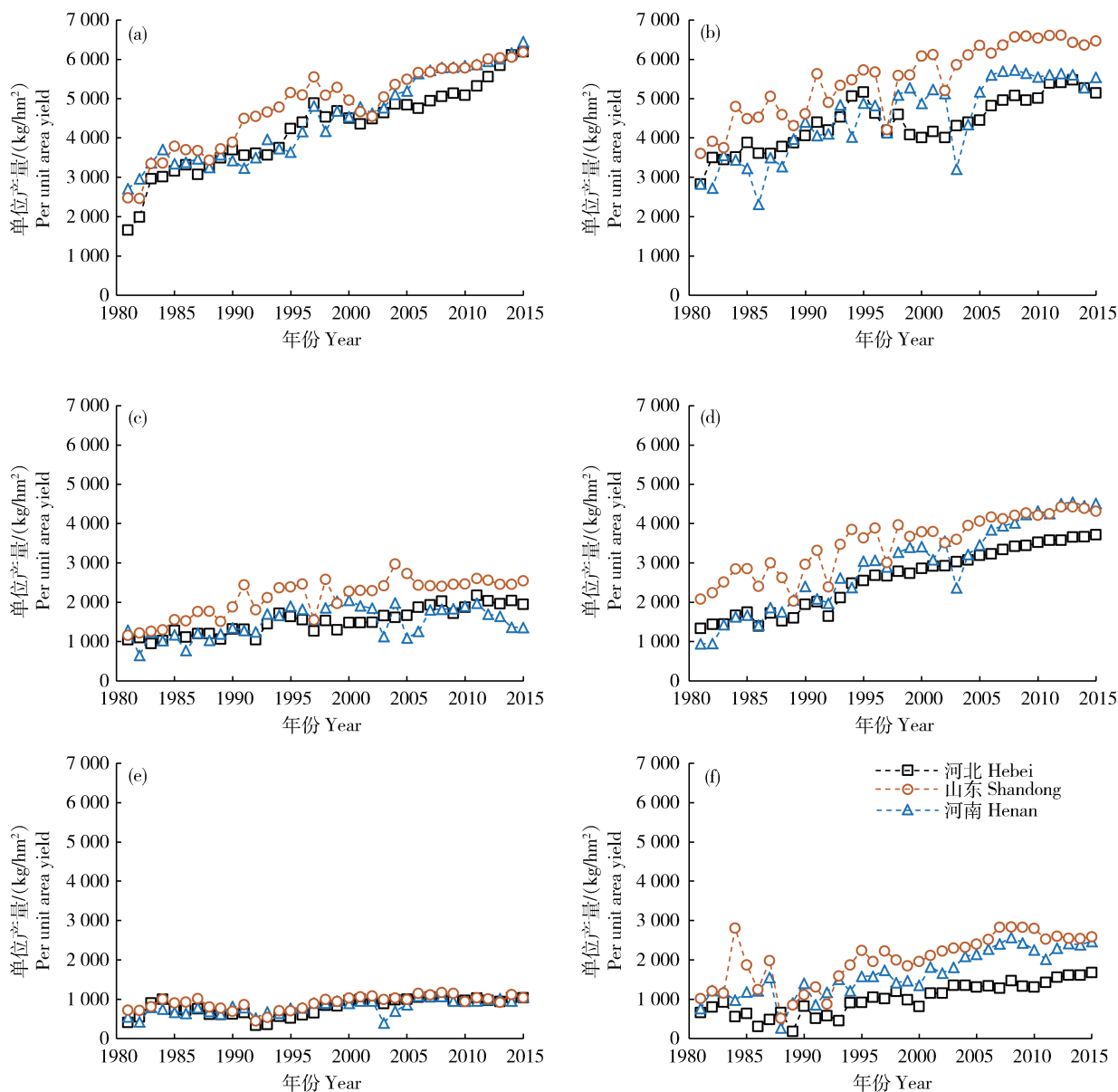


图 4 1981—2015 年河北、河南和山东 3 个省冬小麦(a),玉米(b),大豆(c),花生(d),棉花(e)和油菜(f)单位面积产量变化特征

Fig. 4 Per unit area yield variation characteristics of winter wheat (a), maize (b), soybean (c), peanut (d), cotton (e) and canola (f) in Hebei, Henan and Shandong province from 1981 to 2015

2.1.4 主要作物综合比较优势指数

冬小麦和玉米是华北地区传统优势作物。表 1 可知,1981—2015 年冬小麦综合优势指数稳定在 0.89 以

上;玉米综合优势指数不断增加,从 1981—1990 年的 0.80 左右增加到 2011—2015 年的 1.2 以上。花生作为华北地区的主要经济作物之一,其综合比较优势指

数逐年增加。大豆和棉花综合比较优势较低,且呈逐年下降趋势,2011—2015 年大豆和棉花的综合比较优

势指数均 ≤ 0.20 。油菜在华北地区的综合比较优势指数呈逐年上升趋势,2011—2015 年达到 0.20 左右。

表 1 华北地区主要作物的综合比较优势指数

Table 1 Comprehensive comparative advantage index of major crops in North China

年份 Year	冬小麦 Winter wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	棉花 Cotton	油菜 Canola
1981—1990	0.89	0.81	0.25	0.27	0.25	0.12
1991—2000	0.92	0.99	0.28	0.40	0.21	0.17
2001—2010	0.89	1.11	0.23	0.48	0.25	0.21
2011—2015	0.94	1.25	0.20	0.51	0.20	0.21

2.2 1981—2015 年华北地区作物生产资料投入变化

1981—2015 年华北地区作物生产化肥用量和有效灌溉面积均呈显著增加趋势,氮肥、磷肥、钾肥施用量和有效灌溉面积显著增加(图 5)。华北地区氮肥、磷肥和钾肥施用总量分别从 1981 年的 219.0、66.0 和 7.9 万 t 增加到 2015 年的 667、294 和 214 万 t;有效灌溉面积从 1981 年的 1 137 万 hm^2 上升到 2015 年的 1 462 万 hm^2 。1981—2015 年河北、河南和山东 3 个省氮肥施用量增速分别为

3.7、7.6 和 3.0 万 t/年,2015 年的氮肥施用量分别为 173、304 和 200 万 t。1981—2015 年 3 个省磷肥施用量增速分别为 1.3、4.4 和 1.6 万 t/年,2015 年的磷肥施用量分别为 61、156 和 77 万 t。1981—2015 年 3 个省钾肥施用量增速分别为 1.4、3.4 和 2.6 万 t/年,2015 年的钾肥施用量分别为 43、102 和 70 万 t。1981—2015 年 3 个省有效灌溉面积增速分别为 3.6、7.0 和 1.6 万 hm^2 /年,2015 年的有效灌溉面积分别为 445、521 和 496 万 hm^2 。

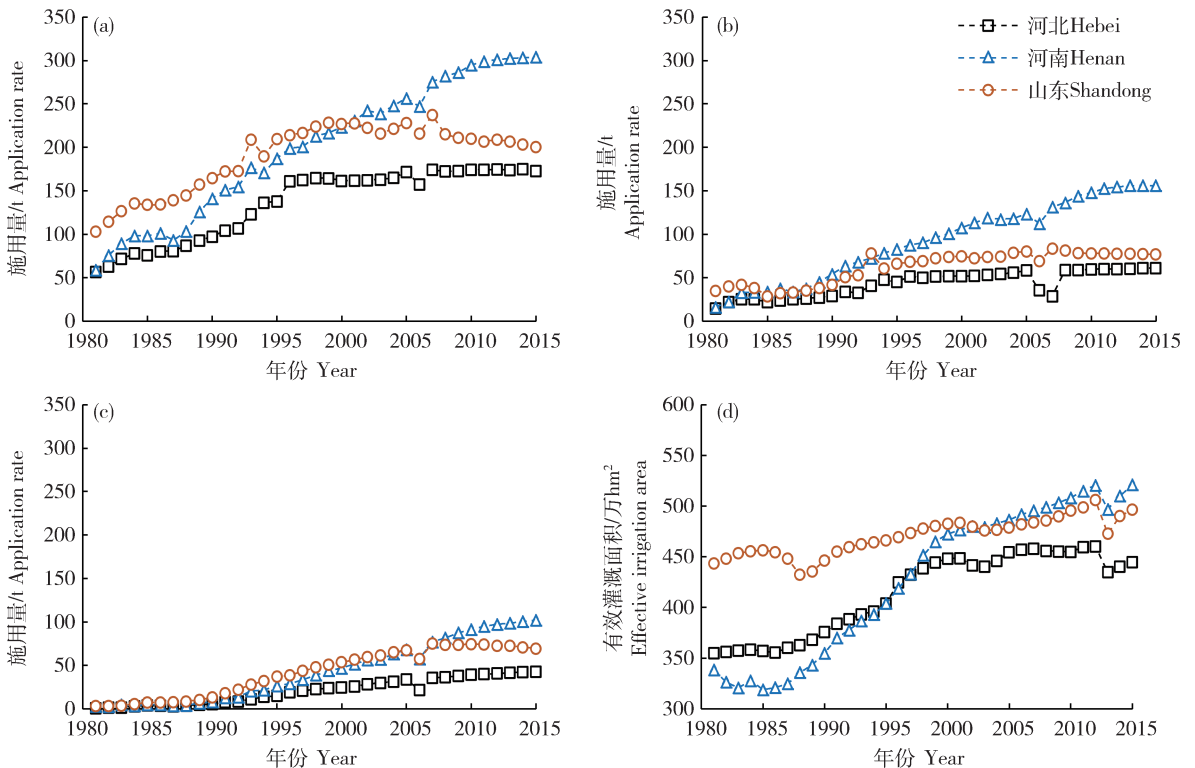


图 5 1981—2015 年河南、河北和山东 3 个省氮肥 (a),磷肥 (b) 和钾肥 (c) 投入及有效灌溉面积 (d) 的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of nitrogen (a), phosphorus (b) and potassium (c) fertilizer input and effective irrigation area (d) in Henan, Hebei and Shandong province from 1981 to 2015

2.3 1981—2015年华北地区作物受灾面积变化

旱灾、涝灾和风暴灾是影响华北地区作物生产的3种主要灾害。1981—2015年华北地区平均旱灾受灾面积、涝灾受灾面积和风暴灾受灾面积达526、146和110万 hm^2 ，旱灾对作物生产的影响尤其严重(图6)。1981—2015年华北地区作物受灾面积整体呈减少趋势，河北、河南和山东3个省旱灾受灾面积分别以4.4、8.3和6.2万 hm^2 /年的速率减

少，2015年的旱灾受灾面积分别为111.0、88.0和99.0万 hm^2 。1981—2015年河北和山东2个省涝灾受灾面积分别以0.2和1.0万 hm^2 /年的速率减少，河南省涝灾受灾面积以0.6万 hm^2 /年的速率增加，2015年3个省的涝灾受灾面积分别为28.0、24.0和5.0万 hm^2 。1981—2015年，河北、河南和山东风暴灾受灾面积发生均较小，其中山东省受灾面积呈上升趋势，河北省和河南省受灾面积呈下降趋势。

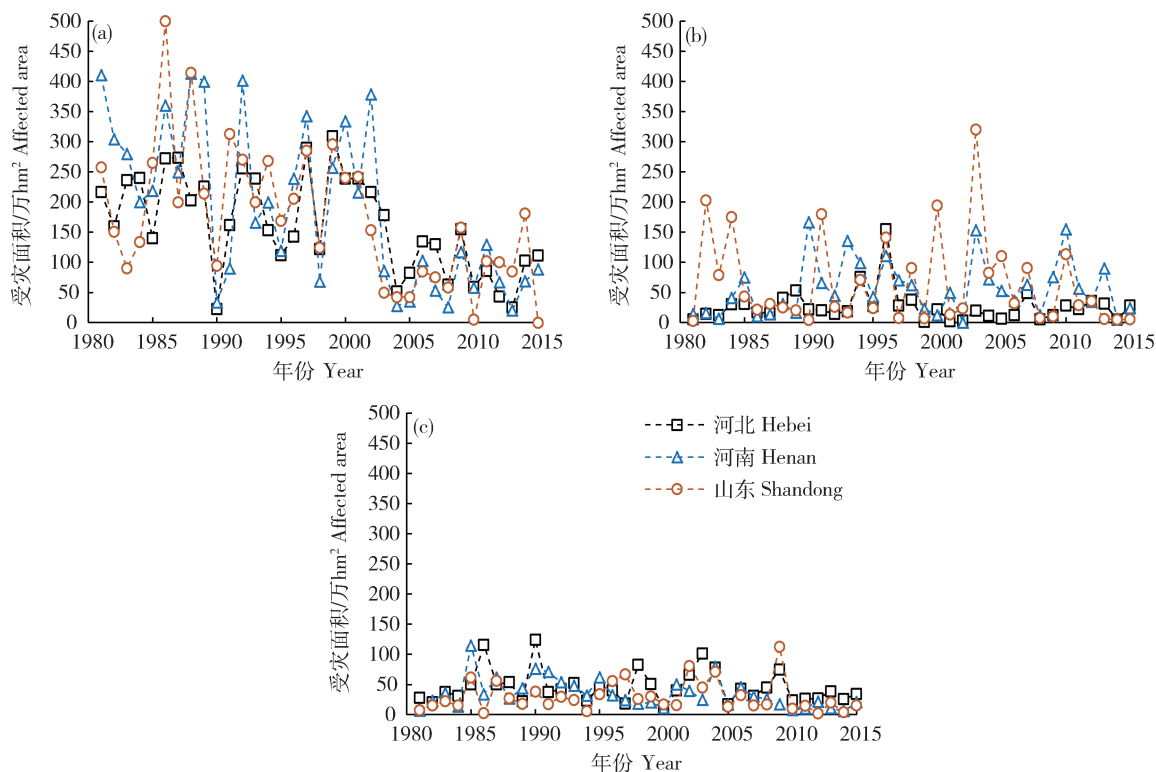


图6 1981—2015年河北、河南和山东3个省旱灾(a),涝灾(b)和风暴(c)面积变化趋势

Fig. 6 The change trend of drought (a), flood (b) and storm (c) areas in Hebei, Henan and Shandong province from 1981 to 2015

2.4 1981—2015年农业生产资料投入和灾害对华北地区主要作物生产的影响

化肥和有效灌溉面积等农业生产资料投入增加显著提高了华北地区农业生产水平(表2)。华北地区氮肥、磷肥和钾肥投入的增加与作物产量的增加呈显著正相关。有效灌溉面积与作物产量之间也呈显著正相关。作物旱灾受灾面积与作物产量呈显著负相关，而涝灾和风暴灾对华北地区作物产量没有显著影响。

3 讨论与结论

3.1 农业生产资料投入增加推动华北地区作物增产

1981—2015年华北地区化肥和有效灌溉面积

等农业生产资料投入水平显著增加，同时期华北地区冬小麦、玉米、大豆、花生、棉花和油菜等主要作物单位面积产量水平显著提升。农业生产资料投入增加显著提升华北地区的作物生产水平。Jiao等^[17]研究表明，由于绿色革命中矮秆品种的引入以及化肥、农药的大量使用，使得中国粮食产量从1961年的1 t/ hm^2 提高到2015年的6 t/ hm^2 。随着化肥、灌溉、机电和良种等生产条件的不断改善，华北地区复种指数从1950年到2000年提高65%，同期粮食单位面积产量水平提高近6倍，主要粮食产量的提高为其他作物发展和种植结构调整提供可能^[16]。

表 2 华北地区化肥施用量、有效灌溉面积、受灾面积和作物产量间的相关分析
Table 2 Correlation analysis between fertilizer application rate, effective irrigation area, affected area and main crop yield in North China

地区作物产量 Regional crop yield	氮肥 Nitrogen fertilizer	磷肥 Phosphate fertilizer	钾肥 Potash fertilizer	有效灌溉面积 Effective irrigation	旱灾 Drought	涝灾 Flood	风暴灾 Storm
河北作物产量 Crop yield of Hebei	0.94**	0.88**	0.95**	0.91**	-0.55**	0.04	-0.14
河南作物产量 Crop yield of Henan	0.97**	0.97**	0.98**	0.94**	-0.55**	-0.22	-0.01
山东作物产量 Crop yield of Shandong	0.83**	0.84**	0.87**	0.84**	-0.66**	0.20	-0.27
华北作物产量 Crop yield of North China	0.94**	0.95**	0.96**	0.93**	-0.65**	-0.09	-0.23

3.2 作物间的比较优势是种植结构演变的主要驱动因子

华北地区作物种植结构逐步向单一化和集约化方向发展,1981—2015 年冬小麦、玉米和花生种植面积显著增加,是目前华北地区最主要的 3 种作物;而同时期,大豆和棉花种植面积急剧下降。研究表明,冬小麦、玉米和花生的比较优势明显高于大豆和棉花(表 1)。在市场和效益和驱动下,农户趋向于种植产量更高和效益更好的冬小麦、玉米和花生等作物。大豆单位面积产量低是限制华北地区大豆发展的主要因素。提升大豆的单位面积产量是发展华北地区大豆生产的首要任务。

3.3 自然因素中旱灾是造成作物单位面积产量波动的主要因素

旱灾是影响华北地区作物生产的主要自然灾害^[18-19]。1986—2012 年,河北省、河南省和山东省农业气象灾害造成的粮食损失分别是 7.9%~17.2%、6.0%~13.3%和 6.6%~14.8%^[20]。影响作物产量的主要因素有技术因素、社会因素和自然因素,已有研究表明,技术因素、社会因素和自然因素对山东省粮食产量变化的影响程度分别为 31.49%、9.57%和 58.93%^[21]。2005—2015 年华北地区自然灾害受灾面积较 1981—2005 年显著减少,尤其是旱灾和涝灾受灾面积,这和华北地区作物有效灌溉面积和基本农田建设等农业科技投入有直接关系。构建多元化的种植结构可以增加系统稳定

性,能有效提升系统应对灾害的适应能力^[22-23]。

4 结 论

1981—2015 年华北地区种植结构发生显著变化,冬小麦、玉米和花生等作物种植面积显著增加,大豆和棉花等作物种植面积显著减少。1981—2015 年,华北地区冬小麦、玉米、大豆、花生、棉花和油菜等主要作物的单位面积产量水平显著增加。氮肥、磷肥、钾肥和有效灌溉面积等农业生产资料投入显著增加,农业生产资料投入与作物产量直接呈显著正相关。旱灾是造成华北地区作物产量波动的主要因素,1981—2015 年华北地区作物生产旱灾受灾面积呈减少趋势。大豆和棉花等作物的比较效益低是造成华北地区这 2 种作物种植面积下降的主要驱动因素。

参考文献 References

- [1] Yang G Y, Wang H, Wang L, Shao W W. Analysis of the relationship between food production, water resources and power consumption in North China [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142(12): 2574-2579
- [2] Zhao Z G, Qin X, Wang Z M, Wang E L. Performance of different cropping systems across precipitation gradient in North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259(12): 162-172
- [3] 高明杰, 罗其友. 水资源约束地区种植结构优化研究—以华北地区为例 [J]. *自然资源学报*, 2008(2): 204-210
Gao M J, Luo Q Y. Optimization of planting structure in water

- resources constrained area: Taking North China as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008 (2): 204-210 (in Chinese)
- [4] 王红营. 基于遥感的华北平原农业土地利用时空变化特征及驱动力分析[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016
Wang H Y. Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in farmland utilization and driving force in the North China Plain[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016 (in Chinese)
- [5] 王红营, 潘学鹏, 罗建美, 罗仲朋, 常春平, 沈彦俊. 基于遥感的华北平原农作物时空分布变化特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1199-1209
Wang H Y, Pan X P, Luo J M, Luo Z P, Chang C P, Shen Y J. Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in crop planting in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1199-1209 (in Chinese)
- [6] 潘学鹏. 华北平原主要作物遥感提取及时空变化研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015
Pan X P. Spatio-temporal variation of main crops planting area in the North China Plain using remote sensing data [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2015 (in Chinese)
- [7] Liu Z X, Gao F, Liu Y, Yang J Q, Zhen X Y, Li X X, Li Y, Zhao J H, Li J R, Qian B C, Yang D Q, Li X D. Timing and splitting of nitrogen fertilizer supply to increase crop yield and efficiency of nitrogen utilization in a wheat-peanut relay intercropping system in China[J]. *The Crop Journal*, 2018, 7(1): 101-112
- [8] Xiao G M, Zhao Z C, Liang L, Meng F Q, Wu W L, Guo Y B. Improving nitrogen and water use efficiency in a wheat-maize rotation system in the North China Plain using optimized farming practices[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 172-180
- [9] Wang Y Q, Zhang Y H, Zhang R, Li J P, Zhang M, Zhou S L, Wang Z M. Reduced irrigation increases the water use efficiency and productivity of winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 112-120
- [10] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454-1464
Zhang X Y. Study on farmland water consumption and water saving irrigation in typical areas of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (10): 1454-1464 (in Chinese)
- [11] Shen Y W, Sui P, Huang J X, Wang D, Whalen J K, Chen Y Q. Global warming potential from maize and maize-soybean as affected by nitrogen fertilizer and cropping practices in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 117-127
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook-2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017 (in Chinese)
- [13] 孙鸿烈. 中国资源百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2006
Sun H L. *Encyclopedia of Chinese Resources* [M]. Beijing: China Encyclopedia Publishing House, 2006 (in Chinese)
- [14] 史磊刚. 我国北方典型粮食作物生产系统碳足迹评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2012
Shi L G. Evaluation on carbon footprint of typical grain crop production systems in Northern China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [15] 尹小刚. 气候变化背景下东北玉米生产的干旱风险与适应对策[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
Yin X G. Drought risks and adaptation measures of maize production in Northeast China under climate change [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [16] 陈阜, 武兰芳, 秦向阳. 华北平原城郊区种植结构调整的内在动力和趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 51-54
Chen Fu, Wu L F, Qin X Y. Intrinsic driven force and trend of planting structure adjustment in the suburban area in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1): 51-54 (in Chinese)
- [17] Jiao X Q, Nyamdavaa M, Zhang F S. The transformation of agriculture in China: Looking back and looking forward[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 755-764
- [18] Liu X F, Pan Y Z, Zhu X F, Yang T T, Bai J J, Sun Z L. Drought evolution and its impact on the crop yield in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 984-996
- [19] 王春乙, 张玉静, 张继权. 华北地区冬小麦主要气象灾害风险评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 203-213
Wang C Y, Zhang Y J, Zhang J Q. Risk assessment of main meteorological disaster of winter wheat in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 203-213 (in Chinese)
- [20] 刘笑. 农业气象灾害和气温降水对华北平原粮食产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018
Liu X. Impacts of agrometeorological disasters and temperature and precipitation on grain yield in North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018 (in Chinese)
- [21] 栾健. 农业自然灾害对山东省粮食生产影响研究[D]. 青岛: 山东农业大学, 2017
Luan J. Study on the impact of agricultural natural disasters on grain production in Shandong Province [D]. Qingdao: Shandong Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [22] Yin X G, Olesen J E, Wang M, Kersebaum K C, Chen H, Baby S, Öztürk I, Chen F. Adapting maize production to drought in the northeast farming region of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 77: 47-58
- [23] Yin X G, Olesen J E, Wang M, Öztürk I, Zhang H L, Chen F. Impacts and adaptation of the cropping systems to climate change in the northeast farming region of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 60-72