

# 降水约束条件下的粮食生产适应度评价

## ——以内蒙古乌兰察布市为例

孙雪萍<sup>1,2,3</sup>, 苏 筠<sup>3</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;

3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 基于年际间降水波动性与粮食生产稳定性之间的关系, 提出了粮食生产适应度评价的概念模型, 并建立评价标准, 将粮食生产适应度分为 1~4 级。以位于北方干旱半干旱雨养农业区的内蒙古乌兰察布市为例, 选取乌兰察布市 1959—2009 年逐年粮食产量、播种面积数据, 逐年逐日气温、降水量数据, 结合数学统计分析揭示了区域粮食生产适应水平的变化趋势。气象数据统计分析结果显示, 该区域降水在波动中有小幅降低, 近 30 年年平均降水量比 20 世纪 60 年代减少约 30 mm; 同期气温升高约 3.1℃, 区域整体暖干早化趋势明显。粮食生产状况统计结果显示: 这一时段内粮食单产上升趋势明显、气象产量波动较大。基于适应度评价模型, 该区粮食生产适应水平大致经历了由 4 级降至 1 级、至 1995 年后又升至 3 级的高→低→高的变化过程。在区域气候条件变化和技术经济进步的情况下, 人们通过不断调整适应措施来应对变化, 其间, 适应水平呈现高低不同的变化。

**关键词:** 降水波动性; 粮食生产稳定性; 适应度; 气候暖干早化

**中图分类号:** S161.6; F307.11 **文献标志码:** A

# Evaluation of adaptation degree for food production under restricted condition of precipitation

## ——A case study in Ulanqab City of Inner Mongolia

SUN Xue-ping<sup>1,2,3</sup>, SU Yun<sup>3</sup>

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

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

3. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the relationship between fluctuation of interannual precipitation and stability of food production, put forward the conceptual model for adaptability evaluation of the food production and established the evaluation standard. The adaptation degree of food production can be divided into 1 to 4 levels. A case study of Ulanqab City in Inner Mongolia, located in rain feed farming areas and arid and semi-arid of Northern China, selected the grain production, sowed areas, daily temperature and precipitation data from 1959 to 2009 in Ulanqab City year by year, combined with the mathematic statistic analysis, has revealed the change trend of the adaptation level of regional food production. The meteorological statistical analysis results showed that: The precipitation in this region had a slight decrease in the fluctuation. In recent 30 years, the yearly mean precipitation was less than 1960 s about 30 mm, the temperature over the same period has increased about 3.1℃, and the regional trend of warm and dry on the whole was obvious. The statistical results of grain production showed that: The increasing trend of grain yield was obvious in this period and the fluctuation of meteorological yield was rather big. Based on the adaptation evaluation model, the adaptation level of grain production in this region has roughly experienced the change procedure from high to low to high as from 4 grade decreased to 1 grade and after 1995 risen to 3 grade again. With the change of regional climate condition and technical economic progress, the people taken constantly adjusting measures to cope with change, between which, the adaptation level has shown the different change in the levels with high and low.

**Keywords:** precipitation fluctuation; stability of food production; adaptation degree; climate warming and drying

收稿日期: 2015-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171402)

作者简介: 孙雪萍(1988—), 女, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向为自然灾害风险评估。E-mail: xues1988@126.com。

随着全球气候变化及其引发的极端天气和气候事件日益增多,“减缓”已不足以消除气候变化的不利影响,“适应与减缓”一并成为应对气候变化的两个重要措施<sup>[1]</sup>。IPCC第三次报告<sup>[2]</sup>中曾指出,气候变化的影响程度及危害大小由适应和减缓措施共同决定;2007年IPCC第四次工作报告<sup>[3]</sup>将气候变化适应性列为其主要研究内容之一;此外,世界气象组织会议(WMO)<sup>[4]</sup>、巴厘岛会议<sup>[5]</sup>、第二届全球减灾平台大会、第四届亚洲部长级减灾大会等诸多重要会议中均提出并强调了“适应”在区域及全球防灾、减灾中的重要作用<sup>[6-8]</sup>。由此可见,在自然灾害风险研究领域,继脆弱性与恢复性研究之后,适应性研究也逐渐成为研究的前沿和热点科学问题。

在全球气候变暖大背景下,极端天气事件尤其是干旱半干旱区的干旱灾害对农业生产产生了很大的威胁,农业生产系统也成为适应性研究的重点或优先领域。中国北方农牧交错带是种植业与畜牧业的过渡地区,地处东南季风边缘,受气候波动和全球增暖的影响,其农牧业生产的气候条件尤其是降水条件处于极不稳定的状态,极易形成农业气象灾害<sup>[9-10]</sup>。干旱半干旱雨养农业区水温条件对农业生产的限制作用,使得农业旱灾风险较大;在与干旱长期为伴的自然环境中,适应干旱日渐成为应对干旱的最优方案。因此研究该区域农牧业旱灾适应性战略,对于制定区域农业发展政策、保护区域生态系统服务功能及国家生态安全具有重要意义<sup>[11]</sup>。

当前国内外农业灾害或突发极端事件的适应,大部分都是停留在定性研究上,对适应水平的定量评价欠缺。比如,通过调查问卷的形式,归纳总结主要的适应措施,如种植结构调整、畜牧业结构调整等<sup>[12-13]</sup>;还有相关研究通过一些农谚来定性探究农业旱灾适应措施<sup>[14]</sup>。在该区,张建松等<sup>[15]</sup>从调整种植结构、增加非农收入、农牧交错的生产方式、生态建设以及设施农业五个方面,对农牧交错带的农业旱灾适应措施进行了深入剖析,提出了三种农牧交错带农业旱灾适应模式:“因地制宜”的空间适应模式,“减轻风险”的时间适应模式;“风险共担”的社会适应模式。此外,考虑到农业生产适应能力、适应水平随着区域气候条件及经济技术水平的发展不断改变,因而适应性的研究应该是动态的、过程性的,当下适应现状的研究多是静态的,动态适应性的研究较少。

基于此,本文提出一个基于降水波动性与粮食产量波动性的量化的粮食生产适应度评价模型,并以内蒙古乌兰察布市为例,研究了该区近50年的粮

食生产适应度水平的动态变化情况。

## 1 降水约束条件下的粮食生产适应度评价模型

### 1.1 降水波动性与粮食生产波动性

降水是影响农业生产尤其是我国干旱半干旱雨养农业区的重要制约因子,降水量的多少、降水的年际波动都会影响到区域粮食生产。降水距平百分率是一个常用的表征降水波动性的指标,见下式:

$$S_i = (S - \bar{S}) / \bar{S} \quad (1)$$

式中, $S$ 为年降水量; $\bar{S}$ 为同期多年平均降水量。

粮食生产波动性是表征农业生产系统稳定水平的重要指标。现今已有学者从气候、社会经济等不同的角度通过相关性、回归分析等统计方法,分析了某一气候条件,如水热因子或农业自然灾害,如旱涝等对粮食产量变化的影响<sup>[16-17]</sup>,并以此评价粮食生产的稳定性。粮食生产受自然和社会因素共同影响,基于此有研究将粮食产量进一步分解为趋势产量和气象产量,进而通过构建评估模型实现了对区域农业气象灾害粮食损失率的定量化计算和分析<sup>[18]</sup>。粮食趋势产量的计算方法主要有直线滑动法<sup>[16]</sup>、多项式(二、三、四次)逼近拟合法<sup>[19-21]</sup>等,其中利用多项式逼近拟合粮食趋势产量的方法较为常用,多项式阶数可由研究区范围和模拟效果确定,一般区域为县、地区级时,二次多项式即可满足要求,如果区域单位为省或更大级别时,可取三或四次多项式进行拟合。

根据通常使用的粮食产量预测模型<sup>[20]</sup>,将作物实际产量分解为粮食趋势产量和气象产量,即:

$$Y = Y_t + Y_w \quad (2)$$

式中, $Y$ 为粮食实际产量; $Y_t$ 为趋势产量; $Y_w$ 为气象产量。

利用二次多项式逼近拟合趋势产量,进而求得气象产量。气象产量反映了气候条件对产量的影响,可以用来衡量粮食生产系统因灾损失量。

由粮食生产气象产量与趋势产量的比值 $Y_i$ 表征粮食生产气象条件(这里主要是降水)的影响程度,在趋势产量不断增加的情况下,这一数值亦可以说明在降水作为主导影响因子的前提下,粮食生产的稳定性。计算公式为:

$$Y_i = Y_w / Y_t \quad (3)$$

### 1.2 粮食生产适应度评价模型

受单位降水变化影响的粮食产量变化情况可在一定程度上反映降水波动对粮食产量的影响,亦即粮食生产对降水的适应水平。由此,以单位降水变

化下的粮食产量波动为依据,构建基于降水约束条件下的粮食生产适应度评价的概念模型(见图 1)。

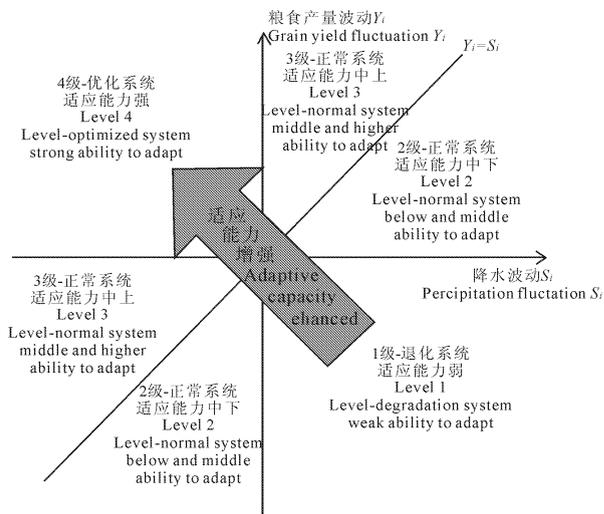


图 1 适应度评价概念模型

Fig. 1 The conceptual model for evaluation of adaptability

由图 1 可以看出,粮食产量波动与降水波动趋势一致即二者比值为 1 时,认为农业系统处于稳定平衡状态;以此为划分依据,将农业生产系统的旱灾适应能力划分为强、中、弱三个等级。若降水波动为负、粮食产量波动为正值时,即图 1 中第二象限,系统为优化状态,具有趋利避害的适应能力,且能力较强;若降水波动与粮食产量波动变化趋势一致即同正同负时,系统为正常状态,其中根据降水波动对粮食产量波动的作用程度,可将适应能力分为中等偏上与中等偏下;若降水波动为正,而粮食产量波动为负值时,系统功能退化,适应能力弱。

为了更好地评价适应水平及效果,利用粮食产量波动值与降水波动值(见公式 1、公式 3)构建基于降水约束的粮食生产适应度指数  $G_i$ ,计算公式为:

$$G_i = Y_i / S_i \quad (4)$$

式中,  $Y_i$  为第  $i$  年粮食单产波动值;  $S_i$  为第  $i$  年降水波动值。

结合图 1,将系统适应度指数按弱、中下、中上、强划分为 1~4 级,划分标准如表 1。

降水与粮食产量是反映旱灾对农业生产影响的最直接的两个指标。选取降水波动性及粮食产量稳定性为参数,构建适应度评价模型,可直观且科学地反映降水约束条件下的粮食生产适应度水平。此外,与部分评估模型相比,该模型较简单易操作,且模型所需基础数据为区域降水及粮食产量数据,较易获取。

表 1 粮食生产适应等级划分标准

Table 1 The grade dividing standard of adaptability level for grain production

适应等级 Adaptability level	条件划分标准 Grading standard	适应能力 Adaptability level
1 级 1 grade	$Y_i < 0, S_i > 0, G_i < 0$	弱 Weak
2 级 2 grade	$Y_i < 0, S_i < 0, G_i > 1$ 或 $Y_i > 0, S_i > 0, 0 < G_i < 1$	中下 Middle and below
3 级 3 grade	$Y_i < 0, S_i < 0, 0 < G_i < 1$ 或 $Y_i > 0, S_i > 0, G_i > 1$	中上 Middle and high
4 级 4 grade	$Y_i > 0, S_i < 0, G_i < 0$	强 Strong

## 2 内蒙乌兰察布市研究实例

### 2.1 区域降水波动及暖干化趋向

本文研究区为旱灾频次较高的内蒙古中部地区的乌兰察布市,这一地区是农牧交错带上典型的雨养农业区。乌兰察布市地处中纬度内陆地区,属中温带大陆性季风气候,其主要气候特点是日照充足,降雨量少,多风干燥,无霜期较短。其中干旱灾害是威胁当地农牧业的最主要自然灾害(图 2)。该市降

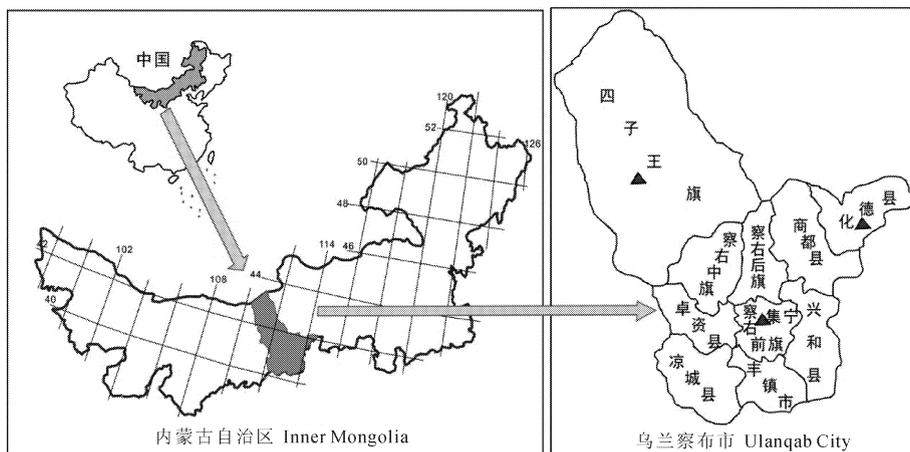


图 2 乌兰察布市区域图

Fig. 2 The regional map of Ulanqab City

雨量分布由南向北逐步减少,由南部年均 430 mm 降至北部的 150 mm。由于自然气候条件恶劣,加之近代大量开垦种地,造成水土流失和风蚀沙化严重,生态平衡失调,是较典型的多灾、低产农牧业区,其中干旱及其所造成的灾害是制约乌兰察布农牧业持续稳定发展的最主要自然因素。

乌兰察布市旱灾按照发生季节分为:春旱、夏旱、秋旱及季节连旱。统计乌兰察布市 1949—2012 年共计 64 a 间的干旱年份的季节属性(图 3),春旱出现了 19 a,频率为 30%,为旱灾高发季节;连季干旱特别是春夏连旱频率较高,达 22%,仅次于春旱,因此春夏之交季节亦属于旱灾高发时期,其它季节连旱发生频率较低。对比分析逐年旱灾季节特征可见,季节连旱的现象进入 20 世纪 80 年代后,呈不断加重趋势,与春旱一同成为区域旱灾高发季节。

选取乌兰察布市有气象站点资料,且可分别代

表前山(南部)、中部、后山(北部)地区的集宁市、化德县、四子王旗三个旗(县),统计三个旗(县)平均 1959—2009 年逐年气温、降水数据,分析区域水温逐年变化情况(图 4)。

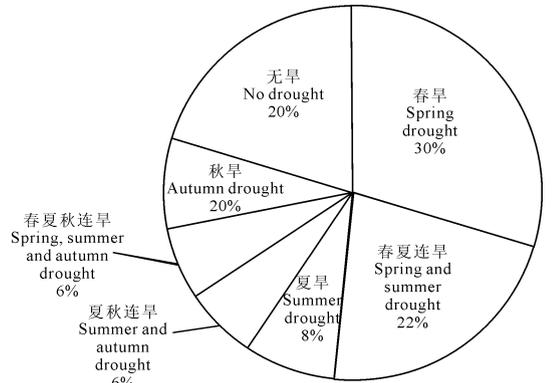


图 3 乌兰察布市旱灾季节构成

Fig.3 The constitutions of drought season in Ulanqab City

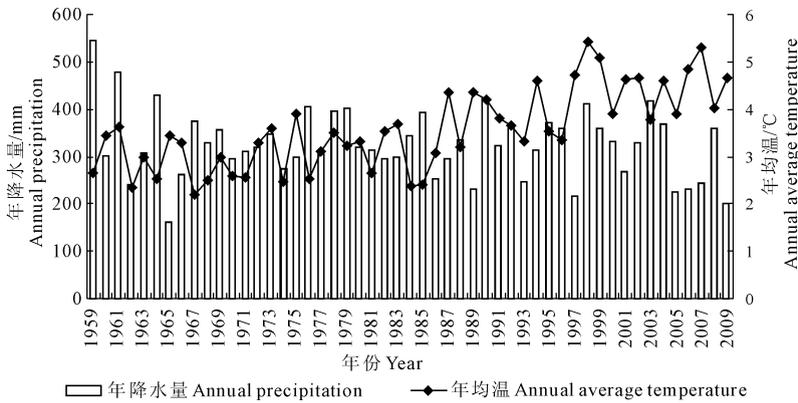


图 4 乌兰察布市降水及气温年际变化情况 (1959—2009 年)

Fig.4 Interannual change situation of precipitation and temperature from 1959 to 2009 in Ulanqab City

乌兰察布市三旗(县)降水量变化均经历了不同程度的减少(20 世纪 60 年代)→小幅增加(20 世纪 70 年代)→减少(20 世纪 80 年代以后)的波动性变化过程,增加幅度小于减少幅度,区域整体降水量在波动中递减,尤其是 20 世纪 80 年代至今的 30 年内,年平均降水量为 314 mm,比 20 世纪 60 年代减少约 30 mm,减少趋势明显。

同期,乌兰察布市年平均温度上升约 3.1℃;尤其是 20 世纪 80 年代以后,气温上升趋势明显。以四子王旗为例,20 世纪 60 年代年平均气温为 2.9℃,70 年代小幅增至 3℃,80 年代至 2009 年气温升至 4℃,比前期增加约 1℃。

综合降水、年均温及积温的逐年变化情况,乌兰察布市整体呈现出降水减少、同期气温升高的趋势,尤其是 20 世纪 80 年代以后,气温升高、降水减少幅度增大,区域气候暖干旱化现象明显。水对农业生

产制约作用增大,农业旱灾风险增加。

## 2.2 区域粮食生产的波动性

统计乌兰察布市 1949—2009 年粮食作物播种面积及产量数据,计算粮食单产,由公式 2 计算表征粮食生产波动性的粮食气象产量,亦可称为粮食单产波动产量(图 5)。

粮食单产整体在波动中上升,20 世纪 90 年代开始上升趋势明显。90 年代以前,粮食单产平均为  $0.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;90 年代以后,粮食单产迅速增加,平均为  $1.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;2000 年以后粮食单产虽然仍存在较大的波动,但上升幅度比前期增大。2004 年粮食单产为  $3.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,达到近 60 年来的最大,比建国初期粮食单产( $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )提高近 6 倍。

由逐年粮食单产气象产量可知,20 世纪 80 年代以前粮食单产波动不大,且主要为正向增加。20 世纪 80 世纪至 90 年代中后期,粮食单产波动以负

向减少为主。20 世纪 90 年代末至 2000 年以后,粮食单产波动转为正向大幅度增加,尤其是 2004 年,粮食单产气象产量为  $1.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,为 60 年内最大值;但在 2005 年以后,既有正向增加亦有负向减少。

综合粮食单产及气象产量情况,区域粮食生产上升趋势明显,且单产波动主要以正向增加为主,整

体粮食生产力增强。

### 2.3 区域粮食生产适应度评价

依据适应能力等级划分标准及适应指数的计算公式,计算 1959—2009 年逐年农业生产旱灾适应等级,见图 6。

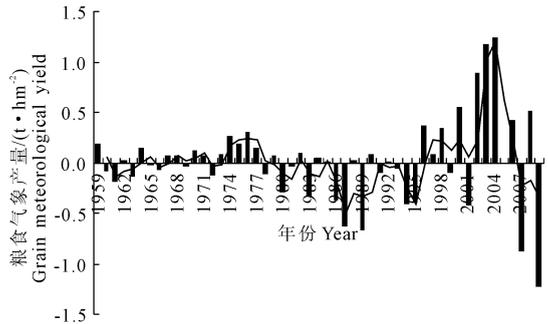
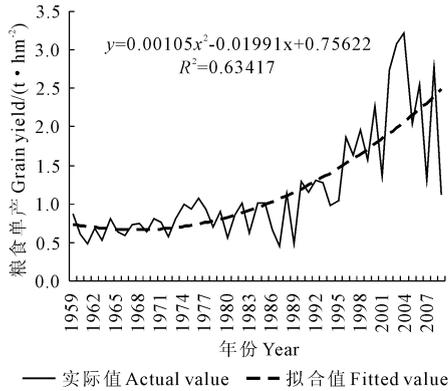


图 5 乌兰察布市粮食单产稳定性(1959—2009 年)

Fig.5 Grain yield stability from 1959 to 2009 in Ulanqab City

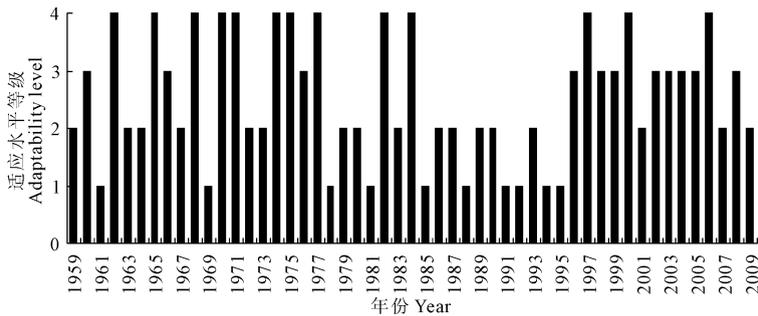


图 6 乌兰察布市粮食生产适应等级(1959—2009)

Fig.6 Adaptability grades of grain production from 1959 to 2009 in Ulanqab City

由图 6 可见,适应性等级在 20 世纪 70 年代以前多为 2 级以上,且其中有 8 a 适应性等级达 4 级,占 51 a 内全部 4 级适应年份总数的 60%,整体适应性较好;进入 20 世纪 80 年代,适应性等级迅速降为 2 级,甚至有些年份降至 1 级,区域整体适应性下降;1990 至 1995 年期间适应性等级降至最低 1 级,适应性最差;20 世纪 90 年代后期至 2000 年以后适应性等级重新升至 3 级,区域适应性水平大幅回升。自 20 世纪 60 年代至 2010 年的 50 a 间,区域农业适应性等级经历了由前期较高(4 级),中期降低(2、1 级),后期大幅升高(3 级)的过程。适应能力的变化原因,有待进一步探讨。

## 3 结论与讨论

本研究基于降水波动性与粮食产量稳定性构建了针对降水约束条件下的粮食生产适应度评价模型,

并基于各自数值属性及两者之间的比值关系,提出可划分粮食生产适应度等级为 1~4 级,定量揭示降水变化对粮食产量的影响;且通过逐年适应等级的计算,可直观呈现年际间适应性水平的动态变化过程。

在实例研究中,乌兰察布市地区气候暖干化趋势明显,降水波动变化大,区域农业生产旱灾风险加大。应用上述模型进行评价,结果显示该区域农业旱灾适应性年代际变化较大,20 世纪 70 年代以前适应度较高,部分年份出现 4 级适应;随气候暖干化,农业生产抵御旱灾能力较低,至 90 年代中期,适应能力等级降为 1 级;1995 年前后,适应级别开始大幅度上升,至 2000 年,系统旱灾适应能力已大幅升为 3 级,农业旱灾系统得以优化,旱灾适应能力不断增强。

选取降水波动性作为该评估模型的唯一气象指标虽可在一定程度上直观反应降水对粮食生产的约

束作用,但作物可用水资源量减少的诱发因子除降水外,还可能与温度升高等因素有关。因此,如何剔除温度等因子的影响仍需要进一步讨论。

区域粮食生产适应度的高低,受本底资源、气候条件和生产投入等诸多因素的影响,如农作物本身抗旱能力的增强、农户有效的田间抗旱耕作,以及基础水利设施建设等。针对该区域农业粮食生产气候适应度变化的驱动因子有待深入研究。

**致谢:**感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院研究生杨帅、赵凡在野外调查中为本论文付出的辛勤工作。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国应对气候变化的政策与行动 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/zhxx/hjyw/200810/t20081030-130641.htm>, 2008-10-30/2012-11-20.
- [2] IPCC. IPCC Third Assessment Report (AR3) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 王长科. WMO 强调适应气候变化的重要性 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 191.
- [5] 居 焯, 李玉娥, 许吟隆, 等. 气候变化适应行动实施框架 [J]. 气象与环境学报, 2010, 6(6): 55-59.
- [6] 居 焯, 韩 雪. 气候变化适应行动进展及对我国行动策略的若干思考 [J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 257-260.
- [7] UNISDR. Drought Risk Reduction Framework and Practices: Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action [R]. United Nations secretariat of International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, 2009.
- [8] AMCDR: Disaster Risk Reduction for Climate Change Adaptation [R]. Convergence, 2010.
- [9] 刘明亮. 我国近期粮食生产的波动性及其与农业自然灾害发生状况的相关分析 [J]. 灾害学, 2000, 15(4): 78-86.
- [10] 王静爱, 史培军. 论内蒙古农牧交错地带土地资源利用及区域发展战略 [J]. 地域研究与开发, 1988, 7(1): 24-29.
- [11] 史培军. 中国北方农牧交错地带的降水变化与“波动农牧业” [J]. 干旱区资源与环境, 1989, 3(3): 3-9.
- [12] 侯向阳, 韩 颖. 内蒙古典型地区牧户气候变化感知与适应的实证研究 [J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1753-1765.
- [13] 孙 芳. 农业适应气候变化能力研究—种植结构与技术方向 [D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2008.
- [14] 尹 君, 苏 筠. 农谚在河南冬小麦种植及气候适应中的应用 [J]. 地域研究与开发, 2011, 30(4): 153-158.
- [15] 张建松, 王静爱, 李 睿, 等. 农牧交错带农业旱灾适应模式与区域可持续发展—以内蒙古兴和县为例 [J]. 灾害学, 2011, 26(2): 91-96.
- [16] 汪青春, 张国胜, 李 琳, 等. 干旱气候生态因素对青海省粮食产量影响的研究 [J]. 干旱区农业研究, 1999, 17(4): 80-85.
- [17] 侯乐锋, 史培军. 近百年来季风区动态变化与其预测 [J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(3): 18-27.
- [18] 王光宇. 安徽省农业气象灾害粮食损失率评估 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 330-332.
- [19] 苏 筠. 内蒙古乌兰察布盟农业土地利用变化对粮食稳产的影响分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 99-103.
- [20] 郑景云. 自然灾害粮食损失的评估模型及粮食灾损量的估计 [J]. 中国农业气象, 1994, 15(6): 7-10.
- [21] 王馥棠. 我国粮食产量气象预测预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1989.

(上接第 168 页)

- [4] 周福生, 穆 青. 野生植物苦豆子的化学成分和主要药理作用 [J]. 中国野生植物资源, 2006, 25(4): 1-3.
- [5] Shao H M, Yang B W, Hu R R, et al. Matrine effectively inhibits the proliferation of breast cancer cells through a mechanism related to the NF- $\kappa$ B signaling pathway [J]. Oncology Letters, 2013, 6(2): 517-520.
- [6] Li J Q, Li C Q, Zeng M D, et al. Preliminary study on therapeutic effect of oxymatrine in treating patients with chronic hepatitis C [J]. Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 1998, 18(4): 227-229.
- [7] Wei J H, Zhu Y, Xu G, et al. Oxymatrine extracted from *Sophora flavescens* inhibited cell growth and induced apoptosis in human osteosarcoma MG-63 cells in vitro [J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2014, 70(2): 1439-1444.
- [8] 高晓原, 贝鑫临, 雷 茜, 等. 宁夏苦豆子资源基本情况及综合开发现状 [J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(2): 17-20.
- [9] Michelena V A, Boyer J S. Complete turgor maintenance at low water potentials in the elongating regions of maize leaves [J]. Plant Physiology, 1982, 69: 1145-1149.
- [10] Neumann P M. The role of cell wall adjustment in plant resistance to water deficits [J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1258-1266.
- [11] 鲁 松. 干旱胁迫对植物生长及其生理的影响 [J]. 江苏林业科技, 2012, 39(4): 51-54.
- [12] 章炳醒, 姚丽萍, 周志强. 干旱胁迫对黄檗幼苗生理及叶片中小檗碱含量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 26-30.
- [13] 王 进, 罗光宏, 颜 霞, 等. 干旱胁迫对苦豆子种子吸胀萌发和幼苗生长的影响 [J]. 中草药, 2011, 42(9): 1807-1811.
- [14] 段启荣, 刘 丹, 王 雪, 等. PEG 渗透胁迫对苦豆子幼苗生理的影响 [J]. 农业科学研究, 2015, 36(1): 20-24.
- [15] 阳 翠, 杨 飞, 刘 萍, 等. 苦豆子种质资源调查及种子生物学特性研究 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(7): 817-820.
- [16] 胡 晋. 种子生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 154-158.
- [17] 邹 琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 159-174.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-165.
- [19] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 83-116.