

# 1985—2010年西藏粮食产量对气候和耕地变化的响应

杨春艳<sup>1,2</sup>, 沈渭寿<sup>3\*</sup>, 李海东<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学信息与控制学院, 南京 210044; 2. 江苏省气象能源利用与控制工程技术研究中心, 南京 210044;  
3. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

**摘要:** 西藏宜耕土地面积少, 粮食产量低而不稳定, 且对气候变化敏感, 已成为影响社会经济发展的重要因素。为进一步揭示粮食产量的变化及其影响因素, 该研究利用 1985—2010 年西藏粮食产量、38 个气象站资料和 4 期遥感数据, 采用 Thornthwaite 模型和指数曲线法计算作物气候生产潜力、分离作物趋势产量和气候产量, 采用气候倾向率和累积距平法分析气候变化趋势, 通过人工目视解译和土地变化率分析耕地的变化, 运用灰色关联分析方法探讨粮食产量与气候变化和耕地面积变化的关系。结果表明: 1) 1985—2010 年, 西藏粮食总产量、气候生产潜力和单位面积粮食产量分别为  $77.83 \times 10^7$  kg、 $7419.58$  kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )、 $1948.93$  kg/ $\text{hm}^2$ , 均呈波动上升趋势, 粮食生产潜力实现率平均为 25.86%, 且呈逐渐上升趋势, 粮食产量正在向气候生产潜力靠近且仍有较大的提升空间; 2) 气候产量占粮食单产的比值在 -10.74%~8.03% 波动, 变化幅度呈减小趋势, 粮食生产受气候的影响程度不断下降; 3) 西藏  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温、生长季平均气温、降水量分别为  $2224.53^\circ\text{C}$ 、 $11.41^\circ\text{C}$ 、 $387.48$  mm, 均表现为增加趋势, 生长季日照时数平均为  $1095.45$  h, 呈减少趋势, 各气候要素变化的转折年份出现在 1994 年; 4) 西藏粮食总产量、粮食单产、气候产量与耕地面积、 $\geq 0^\circ\text{C}$  积温和生长季降水量的关联度均介于 0.633~1.321 之间, 与生长季平均气温、日照时数的关联度介于 0.595~0.641 之间。耕地面积、 $\geq 0^\circ\text{C}$  积温和生长季降水量是影响粮食产量的最主要因素。该研究可为识别粮食产量及其影响因素的变化规律, 进一步提高粮食产量, 保障西藏社会经济可持续发展提供参考。

**关键词:** 气候变化; 粮食; 遥感; 耕地变化; 灰色关联分析; 西藏高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.035

中图分类号: F301.2; S162.5<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0261-09

杨春艳, 沈渭寿, 李海东. 1985-2010 年西藏粮食产量对气候和耕地变化的响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 261—269. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.035 <http://www.tcsae.org>

Yang Chunyan, Shen Weishou, Li Haidong. Response of grain yield in Tibet to climate and cultivated land change during 1985-2010[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 261—269. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.035 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

来自所有大陆和多数海洋的观测证据表明, 许多自然系统正在受到区域气候变化特别是温度升高的影响<sup>[1]</sup>。农业是对气候变化最为敏感的行业之一, 光、温、水是农业自然条件中最重要的气候因素。气候变化通过气候成分( $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 等)<sup>[2-6]</sup>、气候要素变化<sup>[7-11]</sup>等多种途径影响农业, 主要表现为对作物种植区域、种植制度、生长状况及产量的影响, 进而威胁到生态脆弱地区的粮食安全。为了充分认识和保障气候变化背景下粮食安全, 分析与探讨粮食产量变化及其与区域关键气候指标、耕地面积之间的关系尤为重要。

许多学者采用作物模型模拟和统计分析方法, 就气

候变化对不同地区、不同作物粮食产量的影响开展了大量研究, 结果表明全球气候变暖导致作物适宜生长范围向高纬度扩展<sup>[2, 12]</sup>、作物潜在生长季节延长<sup>[13]</sup>、美国一些地区粮食产量提高、印度<sup>[14]</sup>和沙特阿拉伯<sup>[15]</sup>等地粮食产量下降。总体而言, 气候变暖使中国粮食产量呈下降趋势, 但是各区域表现不同, 对于北方的粮食产区, 气候变暖使热量资源增加, 一年两季的种植区域北界向北移动, 不耐寒的高产作物被引种到此类区域, 使整体产量上升; 在中部和南部地区, 气候变暖使作物生长期变短, 干物质积累变少, 产量降低<sup>[16]</sup>。

西藏是青藏高原的主体, 素有“地球第三极”和“世界屋脊”之称, 近年来气候变化趋势明显, 表现为: 年日照时数显著减少, 减少速度较西北地区更快; 年平均气温升高明显, 上升速度远高于青藏高原、中国和全球平均水平; 年降水量略有增加, 增加速度略高于中国干旱半干旱区降水量的增加速度, 是典型的气候变化先导区<sup>[17-18]</sup>。目前, 西藏产业结构仍以农牧业为主, 粮食生产自给能力低且不稳定, 已成为影响西藏社会经济可持续发展的重要因素之一。因此, 研究西藏粮食生产状况及其动态变化, 探求气候变化、耕地面积变化对粮食产量的影响, 对合理利用西藏土地资源和稳定粮食生产体系具有重要

收稿日期: 2015-07-02 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项(201209032); 国家自然科学基金(41301611)

作者简介: 杨春艳, 女, 内蒙古通辽人, 博士生, 讲师, 主要研究方向为 3S 技术在生态环境中的应用。南京 南京信息工程大学信息与控制学院, 210044。Email: yangcy888@163.com。

\*通信作者: 沈渭寿, 男, 甘肃景泰人, 博士, 研究员, 主要研究方向为生态保护与修复。南京 环境保护部南京环境科学研究所, 210042。

Email: shenweishou@163.com

意义。汤小槽等<sup>[19]</sup>认为 1960—2005 年西藏粮食产量对气候变化的响应密切；普布次仁<sup>[20]</sup>则认为 2003—2011 年西藏粮食播种面积呈下降趋势，粮食单产呈波动性增加，粮食总产量呈下降趋势。关于气候变化对西藏农业气候热量资源<sup>[21]</sup>、界限温度<sup>[22]</sup>、作物气候生产力<sup>[23]</sup>、耕地面积变化<sup>[24]</sup>影响的已有研究表明：1971—2000 年西藏大部分气象站点呈  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  初日提早、终日推迟、持续日数延长和积温增加的趋势，1980—2010 年西藏耕地表现出向高海拔和低海拔、较高纬度地区扩展的趋势，得出暖湿型气候对作物生产有利，冷干型气候对作物生产不利的结论。

然而，已有研究亦存在以下不足：一是较少考虑对作物生长发育有重要影响的积温指标；二是多采用年平均气温、年降水量等研究气候变化；三是较少考虑耕地面积变化对粮食产量的影响，即使考虑也多采用统计数据进行分析<sup>[20]</sup>。粮食产量主要取决于粮食单产和耕地面积，为了全面了解近几十年西藏粮食产量及其对气候和耕地变化的响应关系，本文利用西藏 38 个气象站资料，通过分析 1985—2010 年 5—9 月生长季的气候变化，利用 1980、1990、2000 和 2010 年 4 期遥感数据获得耕地面积数据，计算作物气候生产潜力、粮食单产、分离作物趋势产量和气候产量，探讨作物生产潜力实现率，分析粮食单产、气候产量与气候因素和耕地面积的响应关系，以期制定全球变暖影响下西藏农业发展规划、促进农业可持续发展提供参考依据。

## 1 研究区概况

西藏自治区（以下简称“西藏”）地处中国西南边疆，位于  $26^{\circ}50'\sim 36^{\circ}53'\text{N}$ 、 $78^{\circ}25'\sim 99^{\circ}06'\text{E}$ （图 1）。与缅甸、印度等国接壤，与新疆、四川、青海、云南等省相邻，总面积  $120\text{万 km}^2$ ，占中国国土面积的  $1/8$ ，平均海拔  $4\ 000\text{ m}$  以上<sup>[25]</sup>。西藏地形复杂，全区分为藏北高原、藏南谷地、藏东高山峡谷和喜马拉雅山地 4 个地带。气候类型独特而复杂，辐射强烈、气温较低、气候干旱，年平均气温  $-2.8\sim 11.9^{\circ}\text{C}$ ，年降水量  $74.8\sim 901.5\text{ mm}$ ，呈东南-西北带状分布<sup>[26]</sup>。近年来，由于气候变化影响，冰川退缩、雪线上升、冻土消融、湿地萎缩、沙化土地面积扩大、原生植被退化、水源涵养功能衰退，生态环境整体退化的形势已十分严峻。

西藏高原地域辽阔，是中国和亚洲的重要生态安全屏障，但适宜耕种的土地面积少，现有耕地面积仅占国土面积的  $0.3\%$ 。西藏耕地<sup>[24]</sup>主要分布雅鲁藏布江中部流域的“一江三河”，以及藏东“三江流域”自然地理条件较好的河谷地区（图 1），这 2 个区域占全区耕地总面积的  $70\%$ ，是西藏农作物的主产区<sup>[27]</sup>。西藏热量资源不足，气候干旱，农作物主要为耐低温、生育期短的麦类、豆类和油菜作物，尤以青稞、小麦种植面积最广。全区水利设施尚不健全，灌溉保证率不足  $50\%$ ，耕作水平不高，粮食产量较低。

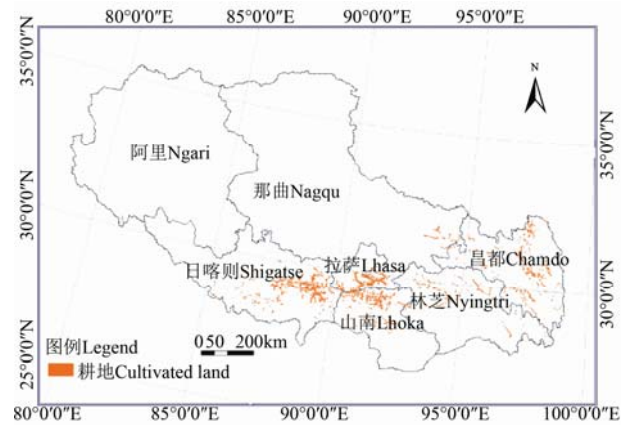


图 1 西藏行政区划及耕地分布图

Fig.1 Administration region and spatial distribution of cultivated land in Tibet

## 2 数据与方法

### 2.1 资料来源

本文所采用气象数据为西藏 38 个气象站 1985—2010 年日照时数、气温、降水量等资料，其中， $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温时间序列数据为稳定通过  $0^{\circ}\text{C}$  的每日气温的和，生长季平均气温为 5—9 月月平均气温的平均值，日照时数和生长季降水量为 5—9 月各月日照时数、降水量的和，缺测值用相应站点前后相邻时段的平均值替代。计算得到各站点  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温、生长季平均气温、降水量、日照时数的数据，利用等权平均法进一步计算出各气候要素时间序列，进行时空变化分析。

粮食总产量数据来源于 2011 年西藏自治区统计年鉴<sup>[25]</sup>，年限为 1985—2010 年。

为分析西藏耕地面积分布及变化情况，综合考虑研究目的及影像的可得性，选取 1980 年多光谱扫描仪 (multi spectral scanner, MSS)、1990 年专题制图仪 (thematic mapper, TM)、2000 年增强型专题制图仪 (enhanced thematic mapper, ETM+) 和 2010 年环境一号卫星 4 期共 59 景影像。其中，MSS、TM 和 ETM+ 影像来源于中国科学院计算机网络信息中心，环境一号卫星影像来源于环境保护部卫星应用中心。以 1:10 万地形图为准，对 4 期遥感影像进行几何精度校正。参照现有的土地利用分类体系，根据影像的纹理、光谱、形状等特征和实地调查数据，建立不同土地利用类型（耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地）遥感影像解译标志，采用人机交互方式进行影像判读，得到 1980—2010 年 4 期耕地面积及分布数据<sup>[24]</sup>。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 气候倾向率和累积距平

采用气候倾向率和累积距平分析气候变化趋势，气候倾向率计算如下<sup>[28]</sup>：

$$X = a_1 \cdot t + a_0 \quad (1)$$

式中：X 为气象要素时间序列；t 为研究时间，a，本文研究时段 1985—2010 年 t 取值依次为 1, 2, ..., n, 其中  $n=26$ ；

$a_1$  通常乘以 10 表示为气候倾向率,  $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  或  $\text{mm}/10\text{ a}$ ;  $a_0$  为系数。

对于某气象要素时间序列  $X$ , 第  $t$  年的累积距平为<sup>[28]</sup>:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中:  $\hat{x}_t$  为累积距平,  $^{\circ}\text{C}$  或  $\text{mm}$ ;  $x_i$  为气象要素在第  $t$  年前第  $i$  年的值,  $^{\circ}\text{C}$  或  $\text{mm}$ ;  $\bar{x}$  为气象要素的平均值,  $^{\circ}\text{C}$  或  $\text{mm}$ 。

### 2.2.2 耕地比例及变化率

基于西藏 1980、1990、2000 和 2010 年 4 期耕地分布及面积数据, 计算耕地比例、变化量及变化率<sup>[29]</sup>:

$$Q = \frac{U_j}{\sum_{j=1}^m U_j} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $Q$  为耕地比例, %;  $U_j$  为第  $j$  个子区域耕地面积,  $\text{km}^2$ ;  $m$  为子区域数量。

$$R = \frac{(U_b - U_a)}{n} \quad (4)$$

$$K = \frac{(U_b - U_a)}{U_a} \cdot \frac{1}{n} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $R$  为耕地年变化量,  $\text{km}^2$ ;  $K$  为耕地年变化率, %;  $U_a$  和  $U_b$  分别为变化前后的耕地面积,  $\text{km}^2$ 。

### 2.2.3 粮食产量

#### 1) 粮食总产量和粮食单产

粮食总产量是西藏全年的粮食生产总量, 数据来源于西藏自治区统计年鉴, 粮食单产为粮食总产量与耕地面积的比值。

#### 2) 气候生产潜力及粮食潜力实现率的计算

气候生产潜力采用国际上通用的桑斯维特纪念模型计算<sup>[30]</sup>:

$$P_v = 30000 \times (1 - e^{-0.0009695(V-20)}) \quad (6)$$

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + (1.05r/L)^2}} \quad (7)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (8)$$

式中:  $P_v$  为气候生产潜力,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $V$  为年平均蒸散量,  $\text{mm}$ ;  $L$  为年平均最大蒸发量,  $\text{mm}$ ;  $r$  为年降水量,  $\text{mm}$ ;  $T$  为年平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

粮食潜力实现率为粮食单产与气候生产潜力的比值, 用来表征粮食生产的增产潜力, %。

#### 3) 趋势产量及气候产量的计算

粮食产量一般由趋势产量和气候产量 2 部分组成, 趋势产量表示经济发展和生产力提高引起的产量变化<sup>[31]</sup>, 气候产量表示气候变化引起的产量变化<sup>[32]</sup>。

$$H = H_t + H_c \quad (9)$$

式中:  $H$  为粮食产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $H_c$  为气候产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;

$H_t$  为趋势产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 采用指数曲线模拟获得:

$$H_t = c \cdot e^{d \cdot t} \quad (10)$$

式中:  $c$  和  $d$  为系数。

### 2.2.4 灰色关联度分析

灰色关联度分析是根据 2 个因素的历史数据序列相同或不同的发展趋势, 来衡量因素间关联程度的一种方法<sup>[33]</sup>。以粮食产量为参考, 分别计算粮食产量与耕地面积、气象要素 2 个系统之间的关联度:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n S(t) \quad (11)$$

式中:  $S_t(t)$  为比较序列耕地面积或气象要素对参考序列在第  $t$  年的关联系数, 其计算公式如下:

$$S(t) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \cdot \Delta_{\max}}{\Delta(t) + \rho \cdot \Delta_{\max}} \quad (12)$$

式中:  $\Delta_{\min}$  和  $\Delta_{\max}$  分别为第  $t$  年比较与参考序列绝对差的最小值和最大值;  $\Delta(t)$  为第  $t$  年比较与参考序列的绝对差;  $\rho$  为分辨系数, 一般在 0~1 之间, 通常取 0.5<sup>[33]</sup>。

由于西藏粮食产量数据统计年限为 1985—2010 年, 因此选取 1985—2010 年作为关联度分析的统一时间尺度, 对粮食产量、耕地面积、气象要素数据进行归一化处理, 开展灰色关联度研究, 分析这 3 个因素之间的关联程度。

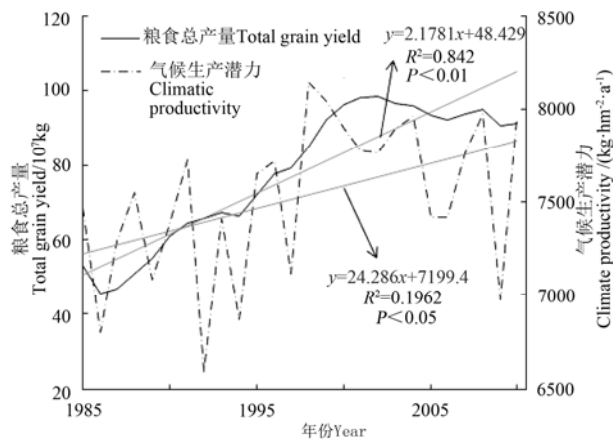
## 3 结果与分析

### 3.1 1985—2010 年粮食产量变化

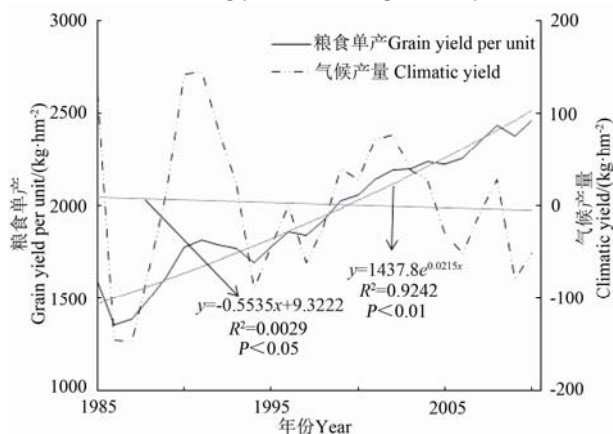
研究期间, 西藏粮食总产量和气候生产潜力均存在先上升后下降的阶段变化, 粮食单产波动上升。由图 2a 可见, 1985—2010 年的年平均粮食总产量为  $77.83 \times 10^7 \text{ kg}$ , 总体上呈波动上升趋势, 增长率为  $21.78 \times 10^7 \text{ kg}/10\text{a}$ 。其中, 1985—2002 年波动上升, 2002 年达最高值  $98.4 \times 10^7 \text{ kg}$ , 2003—2010 年波动下降。

西藏气候生产潜力平均为  $7419.58 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 呈增加趋势, 增长率为  $242.86 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{a})$ 。其中, 1985—1998 年波动上升, 1998 年达到最大值  $8148.33 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 1999—2010 年波动下降。1985—2010 年西藏粮食单产为  $1948.93 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 呈波动上升趋势, 增长率为  $410.9 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot 10\text{a})$ , 粮食单产从 1985—1998 年的  $1692.58 \text{ kg}/\text{hm}^2$  增加到 1999—2010 年的  $2248 \text{ kg}/\text{hm}^2$  (图 2b)。

以 1998 年为界, 西藏粮食生产潜力实现率有了大幅度的提高, 气候产量占粮食单产的比例大幅降低。西藏粮食生产潜力实现率平均为 25.86%, 呈逐渐上升趋势, 从 1985—1998 年平均为 23.06%, 上升到 1999—2010 年的 29.01%。根据 1985—2010 年西藏粮食趋势产量的指数曲线方程 (图 2b), 气候产量呈波动变化趋势。气候产量占粮食单产的比值在  $-10.74\% \sim 8.03\%$  波动, 但变化幅度呈不断呈降低趋势, 由 1985—1998 年平均 4.9%, 下降到 1999—2010 年的 1.98%。



a. 粮食总产量和气候生产潜力  
a. Total crop yield and climate productivity



b. 粮食单产和气候产量  
b. Crop yield per unit and climatic yield

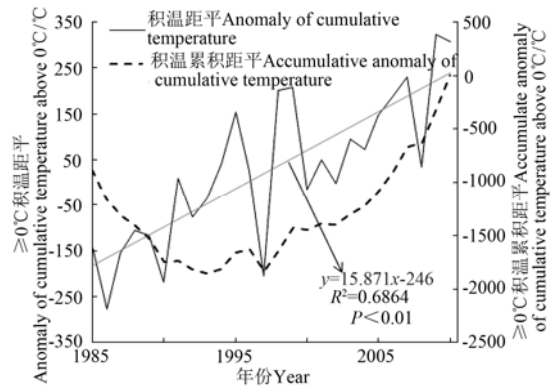
图2 1985—2010年西藏粮食总产量、气候生产潜力、单产和气候产量变化

Fig.2 Changes in total crop yield, climate productive potential, crop yield per unit and climatic yield from 1985 to 2010

### 3.2 1985—2010年气候变化趋势

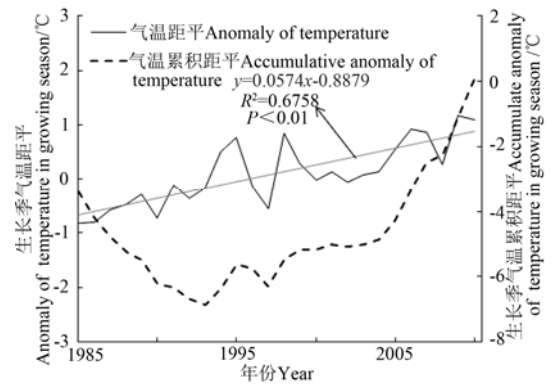
研究期间, 西藏 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季平均气温、降水量波动增加, 生长季日照时数波动减少。1985—2010年西藏年平均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温为 $2\,224.53^{\circ}\text{C}$ , 生长季平均气温 $11.41^{\circ}\text{C}$ 、降水量 $387.48\text{ mm}$ 、日照时数 $1\,095.45\text{ h}$ 。由图3可见, 西藏 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季平均气温、降水量变化表现为波动增加趋势, 上升速率分别为 $158.71^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.57^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $23.45\text{ mm}/10\text{a}$ ; 生长季日照时数则呈减少趋势, 下降速率为 $49.38\text{ h}/10\text{a}$ 。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、平均气温累积距平曲线先下降后上升, 对应着1994年前后气温由偏低期进入偏高期; 年降水量累积距平曲线呈现先波动下降后上升、再下降的趋势, 表明降水量于1994年前后由偏少期进入偏多期、2005年之后有所减少的波动变化; 日照时数则表现出1994年前后由偏多期进入偏少期。

对1994年前后 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季平均气温、降水量、日照时数的分段研究发现, 以1994年为界, 西藏气温、日照、降水存在着明显的阶段变化特征,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季平均气温、降水量的均值都有较大程度的提高, 日照时数均值则表现出明显的下降(表1)。



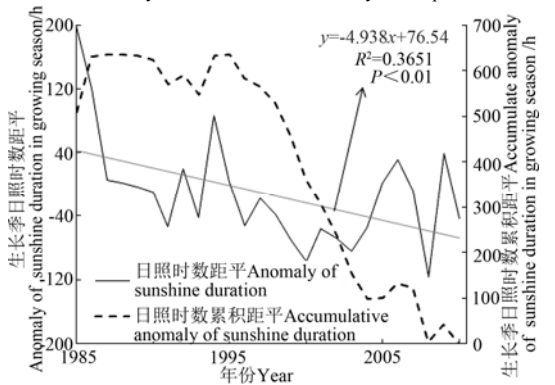
a.  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温距平及累积距平

a. Anomaly and accumulative anomaly of cumulative temperature above  $0^{\circ}\text{C}$



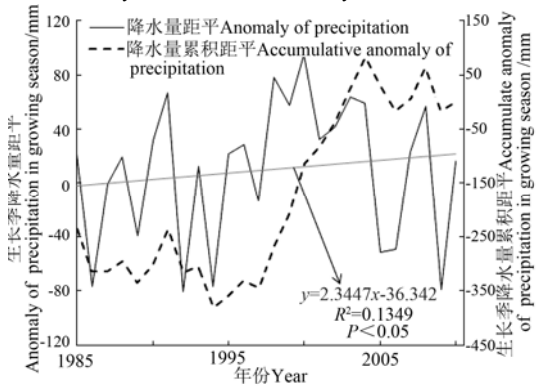
b. 气温距平及累积距平

b. Anomaly and accumulative anomaly of temperature



c. 日照时数距平及累积距平

c. Anomaly and accumulative anomaly of sunshine duration



d. 降水量距平及累积距平

d. Anomaly and accumulative anomaly of precipitation

图3 西藏 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季平均气温、降水量、日照时数距平及累积距平曲线

Fig.3 Anomaly and accumulative anomaly of cumulative temperature above  $0^{\circ}\text{C}$ , temperature, precipitation and sunshine duration in growing season



表 1 西藏气温、日照、降水量变化特征  
Table 1 Changes of temperature, sunshine duration and precipitation in Tibet

研究时段 Study phase	≥0℃积温 Cumulative temperature above 0/℃	生长季平均气温 Temperature in growing season/℃	生长季日照时数 Sunshine duration in growing season/h	生长季降水量 Precipitation in growing season/mm
1985—1994 年	2088.61	10.93	1139.65	365.33
1995—2010 年	2309.49	11.71	1067.82	401.32

3.3 1985—2010 年耕地面积变化

2010 年西藏耕地面积为 3 703 km<sup>2</sup>，仅占全区土地总面积 0.31%，主要分布在 26°N~33°N、海拔 3 200~4 200 m 的“一江三河”地区。图 4a 表明，西藏耕地在地区分布上差异非常大，日喀则地区一直是耕地面积最大的地区，占全区耕地总面积的 40%左右，其次是拉萨、山南，这三个地区耕地面积占全区耕地总面积的 70%以上，昌都的耕地面积占全区耕地总面积的比例有不断提升趋势，阿里地区耕地面积一直最小。

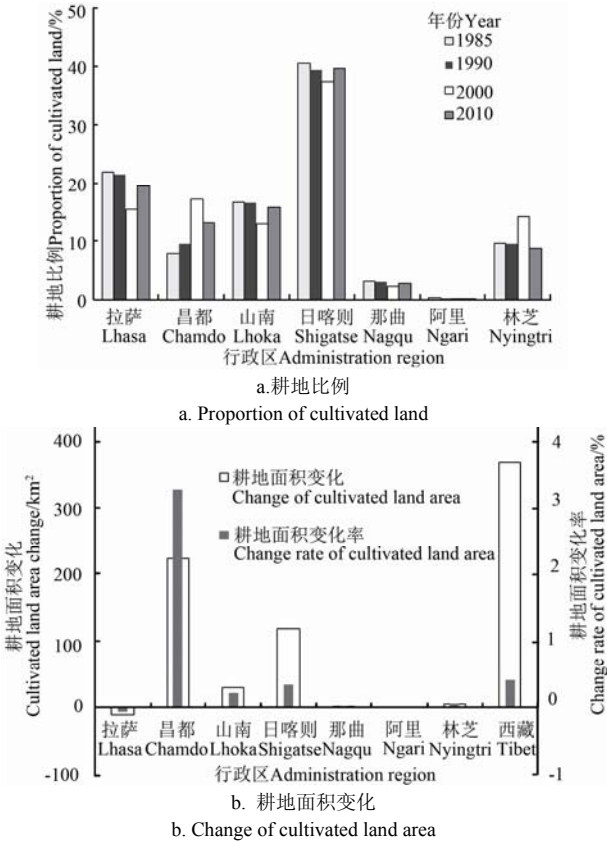


图 4 1985—2010 年西藏各地区耕地比例和面积变化  
Fig.4 Proportion and change of cultivated land area in different administration regions of Tibet from 1985 to 2010

由图 4b 可见，1985—2010 年西藏耕地面积呈增加趋势，增加了 367.34 km<sup>2</sup>。从空间变化看，拉萨地区耕地面积减少了 10.58km<sup>2</sup>，阿里地区没有太大变化，其他地区耕地面积有所增加，其中，昌都地区耕地面积增加最多，共增加了 222.96 km<sup>2</sup>，其次是日喀则地区，增加了 118.48 km<sup>2</sup>。就耕地面积变化率而言，西藏全区耕地年变化率为 0.42%，不同地区差异明显，拉萨地区呈负增长态势，其他地区正增长，其中，昌都地区的耕地面积变化率远高于其他地区。

3.4 1985—2010 年粮食产量与气候变化、耕地面积的关联性

由表 2 可见，1985—2010 年西藏粮食总产量、粮食单产、气候产量变化的母序列分别与 5 个子序列（≥0℃积温、生长季平均气温、降水量、日照时数、耕地面积）表现为不同的关联序。总体而言，西藏粮食总产量、粮食单产、气候产量的变化均表现为受耕地面积、≥0℃积温和生长季降水量影响较大（关联度均介于 0.633~1.321），受生长季平均气温影响较小、生长季日照时数的影响最小（关联度均介于 0.595~0.641）。由此可见，西藏粮食总产量的变化主要受耕地面积的影响，生长季降水量次之，再次是≥0℃积温；西藏粮食单产的变化表现为受≥0℃积温和耕地面积的影响最大，其次是生长季降水量；气候产量则受生长季降水量的影响最大，耕地面积次之，再次是≥0℃积温的影响。

4 讨 论

相关研究表明，气候变化对全球大部分地区作物和其他粮食生产的负面影响比正面影响更为普遍，正面影响仅见于高纬度地区<sup>[2, 34]</sup>。而且，气候变化影响粮食安全，全球粮食总产量会因严重自然灾害而降低，到 2030 年，中国种植业产量总体上因全球变暖可能减少 5%~10%左右，其中小麦，水稻和玉米三大作物均以减产为主<sup>[35]</sup>。然而，本研究对西藏粮食产量与气象因素、耕地面积之间的关联分析表明，1985—2010 年西藏粮食产量总体呈波动上升趋势，且仍有较大的增产空间，1985 年以来的≥0℃积温、生长季降水量的增加趋势（图 3），导致了高海拔地区热量和水分改善，有利于提高西藏粮食产量。气候变化对高海拔地区粮食生产的正面影响大于负面影响。大量地面观测和模型模拟表明，未来气候变暖趋势可能进一步加剧，总体而言，西藏粮食安全形势在不断改善。

表 2 1985—2010 年西藏粮食产量与生长季气象要素及耕地面积的关联度  
Table 2 Correlation degree between crop yield and climatic factors in growing season, and cultivated land area in Tibet from 1985 to 2010

产量类型 Yield types	≥0℃积温 Cumulative temperature above 0	平均气温 Mean temperature	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration	耕地面积 Cultivated land area
粮食总产量 Total grain yield	0.633	0.616	0.645	0.595	0.695
粮食单产 Crop yield per unit	0.660	0.614	0.645	0.596	0.660
气候产量 Climatic yield	0.652	0.641	1.321	0.625	0.686

截至 2010 年, 西藏人口超过 300 万人, 就目前的粮食产量而言, 在温饱水平下西藏人口已接近饱和, 但是在小康水平下已远远超过其粮食生产可支撑的人口数量。对于粮食生产系统而言, 耕地面积和粮食单产是影响粮食产量的 2 个重要因素。然而, 西藏经济相对落后, 人均耕地面积很少, 农业生产水平不高, 后备耕地资源非常有限且开发难度大。近年来, 随着藏区跨越式发展和城镇化进程的加快, 部分优质耕地资源遭到破坏, 虽然总体而言耕地面积增加、粮食单产得到一定的提高, 但仅在一定程度上抵消了由于原有耕地破坏带来的粮食安全问题, 这与普布次仁关于西藏耕地与粮食生产动态变化的研究结果一致<sup>[20]</sup>。

为充分利用气候变暖的有利条件、满足人口增长对西藏粮食生产的新需求, 亟待加强适应气候变化能力建设, 以增加粮食产量、维护粮食安全。研究表明, 西藏春秋季热量资源增加明显, 且正值作物或牧草生长始末期, 应充分根据气候变化和农业气候热量资源的变化特征, 调整相应农事活动, 保证作物的正常生长<sup>[21]</sup>。因此, 为维护西藏粮食安全, 利用气候变暖的正面效益, 同时应对极端气候事件带来的不利影响, 挖掘西藏粮食生产潜力和增产空间, 建议采取积极的适应对策和措施: 一是结合气候变暖有利条件, 科学评估与预测 2℃ 甚至 4℃ 温升情景下西藏农业气候资源状况, 界定高海拔、高纬度地区适宜的可耕范围; 二是要严守耕地保护红线, 防止破坏和挤占耕地资源, 严格落实耕地占补平衡制度, 确保耕地面积不减少、用途不改变、质量有所提高; 三是根据气候资源分布和不同作物品种对热量、水分的要求, 加强农田水利基础设施建设, 提高应对气候变化风险(干旱、洪涝等)的灌排保障水平; 四是开展气候变暖新形势下的西藏农业气候资源区划, 科学合理地制定农业发展规划, 稳步提高粮食生产水平, 促进农业可持续发展, 确保粮食安全。

## 5 结 论

1) 1985—2010 年西藏年平均粮食总产量、气候生产潜力分别为  $77.83 \times 10^7 \text{ kg}$ 、 $7419.58 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 均存在先上升后下降的阶段变化, 粮食单产平均为  $1948.93 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 呈波动上升趋势。粮食生产潜力实现率平均为 25.86%, 且呈逐渐上升趋势, 表明粮食单产仍有较大的增产空间。气候产量占粮食单产的比例介于 -10.74%~8.03%, 变化幅度不断减小, 表明气候因素对单产的影响不断降低。

2) 1985—2010 年西藏气候呈暖湿化趋势,  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温、生长季平均气温、降水量变化有所增加, 生长季日照时数不断减少。各气象要素变化的转折年份出现在 1994 年,  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温、平均气温以 1994 年为界由偏低期进入偏高期, 年降水量由偏少期进入偏多期, 日照时数则由偏多期进入偏少期。

3) 西藏耕地在地区分布上差异非常大, 日喀则地区一直是耕地面积最大的地区, 1985—2010 年西藏耕地面积呈增加趋势, 耕地年变化率为 0.42%。其中, 昌都地区

耕地面积增加最多, 耕地面积变化率远高于其他地区。

4) 西藏粮食总产量、粮食单产、气候产量的变化均受耕地面积、 $\geq 0^\circ\text{C}$  积温和生长季降水量影响大。其中, 西藏粮食总产量主要受耕地面积的影响, 生长季降水量次之, 粮食单产主要受  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温和耕地面积的影响, 气候产量则受生长季降水量的影响最大。

本研究综合运用遥感影像、气象数据、统计资料等多种类型数据, 对 1985—2010 年西藏粮食产量、气候变化和耕地面积变化进行了研究, 分析了影响西藏粮食总产量、粮食单产和气候产量的主要因素, 探讨了气候变暖背景下保障西藏粮食生产的对策建议。然而, 本研究立足于西藏全区尺度, 没有考虑不同区域自然地理条件、河谷地形和海拔梯度, 以及不同作物类型的差异性, 亦没有以行政区为单元动态分析各地区(县)粮食产量与气候变化、耕地面积变化的耦合关系, 这些方面均需在今后的研究与农业气候资源区划中进一步细化完善。

## [参 考 文 献]

- [1] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311—314.  
Qin Dahe, Luo Yong, Chen Zhenlin, et al. Latest advances in climate change sciences: interpretation of the synthesis report of the IPCC forth assessment report[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(6): 311—314. (in Chinese with English abstract)
- [2] 谢立勇, 李悦, 徐玉秀, 等. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 235—239.  
Xie Liyong, Li Yue, Xu Yuxiu, et al. Updated understanding on the impacts of climate change on food production and food security[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(4): 235—239. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蔡运龙, Barry Smit. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策[J]. 地理学报, 1996, 51(3): 202—211.  
Cai Yunlong, Barry Smit. Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture under global climate change [J]. Acta Geographic Sinica, 1996, 51(3): 202—211. (in Chinese with English abstract)
- [4] 崔读昌. 气候变暖对我国农业生产的影响与对策[J]. 中国农业气象, 1992, 13(2): 16—20.  
Cui Duchang. The Possible influence of climate getting warmer on agricultural production in China[J]. Chinese Journal of Agro Meteorology, 1992, 13(2): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌. 全球气候变化对农业生态系统的影响及研究对策[J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(3): 203—208.

- Wang Yixiang, Weng Boqi, Huang Yibin. Effects of global climate change on agriculture ecosystems and research strategy for the future[J]. Subtropical Agriculture Research, 2006, 2(3): 203—208. (in Chinese with English abstract)
- [6] 何雨红, 郑有飞, 何都良. 紫外辐射对农田生态系统的影响研究综述[J]. 中国农业气象, 2002, 23(1): 47—52.
- He Yuhong, Zheng Youfei, He Duliang. A summary of research on the effects of enhanced ultraviolet radiation on field ecosystems[J]. Chinese Journal of Agro Meteorology, 2002, 23(1): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [7] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877—1885.
- Xiao Guoju, Zhang Qiang, Wang Jing. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1877—1885. (in Chinese with English abstract)
- [8] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698—1706.
- Pan Genxing, Gao Min, Hu Guohua, et al. Impacts of climate change on agricultural production of China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30(9): 1698—1706. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黄维, 邓祥征, 何书金, 等. 中国气候变化对县域粮食产量影响的计量经济分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(6): 677—683.
- Huang Wei, Deng Xiangzheng, He Shujin, et al. An econometric analysis on the impacts of climatic change on grain production at counties of China[J]. Progress of Geography, 2010, 29(6): 677—683. (in Chinese with English abstract)
- [10] 丑洁明, 叶笃正. 构建一个经济-气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 347—353.
- Chou Jieming, Ye Duzheng. Assessing the effect of climate changes on grains yields with a new economy-climate model[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(3): 347—353. (in Chinese with English abstract)
- [11] 邓可洪, 居辉, 熊伟. 气候变化对中国农业的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 439—441.
- Deng Kehong, Ju Hui, Xiong Wei. The impacts of climate change on agriculture in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(5): 439—441. (in Chinese with English abstract)
- [12] Holzkämpera A, Calanca P, Fuhrera J. Analyzing climate effects on agriculture in time and space[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 3(2): 58—62.
- [13] Jørgen E Olesen, Marco Bindi. Consequences of climate change for European agricultural productivity[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(2): 239—262.
- [14] Shakeel A Khan, Sanjeev Kumar, Hussain M Z, et al. Climate Change and Crops [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [15] Fahad M. Alkolibip. Climatic Change[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [16] 权畅, 景元书, 谭凯炎. 气候变化对三大粮食作物产量影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 361—367.
- Quan Chang, Jing Yuanshu, Tan Kaiyan. Progress in research of impacts of climate change on yield of three major grain crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(32): 361—367. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 290—298.
- Yang Chunyan, Shen Weishou, Lin Naifeng. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(2): 290—298. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 西藏高原近 50 年气温和降水时空变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 167—172.
- Yang Chunyan, Shen Weishou, Lin Naifeng. Temp-spatial changes of temperature and precipitation over Tibet Plateau during the last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 167—172. (in Chinese with English abstract)
- [19] 汤小槽, 金晓斌, 盛莉, 等. 基于小波分析的粮食产量对气候变化的响应研究[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(6): 88—92.
- Tang Xiaolu, Jin Xiaobin, Sheng Li, et al. Research on response of grain output to climate change based on wavelet analysis: A case study of Tibet[J]. Geography and Geo-information Science, 2008, 24(6): 88—92. (in Chinese with English abstract)
- [20] 普布次仁. 西藏耕地与粮食生产动态变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Pu Buciren. Dynamic Change of Farmland and Grain Production[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张戈丽, 欧阳华, 周才平. 近 50 年来气候变化对西藏“一江两河”地区农业气候热量资源的影响[J]. 资源科学, 2010, 32(10): 1943—1954.
- Zhang Geli, Ou Yanghua, Zhou Caiping. Response of agricultural thermal resources to climate change in the region of the brahmaputra river and its two tributaries in Tibet during past 50 years[J]. Resources Science, 2010, 32(10): 1943—1954. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杜军, 胡军, 索朗欧珠. 西藏高原农业界限温度的变化特征[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 289—298.

- Du Jun, Hu Jun, Sonam. Climatic change of agriculture critical temperature over Tibetan plateau from 1971 to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 289—298. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杜军, 胡军, 周保琴, 等. 西藏一江两河流域作物气候生产力对气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 141—145.
- Du Jun, Hu Jun, Zhou Baoqin, et al. Responses of climate-productivity to climatic change in central Tibet from 1961 to 2005[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 141—145. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨春艳, 沈渭寿, 王涛. 近 30 年西藏耕地面积时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 264—271.
- Yang Chunyan, Shen Weishou, Wang Tao. Spatial-temporal characteristics of cultivated land in Tibet in recent 30 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(1): 264—271. (in Chinese with English abstract)
- [25] 西藏年鉴编委会. 西藏年鉴 2011[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 2012.
- [26] 中国网. 西藏自治区自然地理概况[EB/OL]. 2009-11-24. [http://www.china.com.cn/aboutchina/zhuanti/09dfgl/2009-11/24/content\\_18945762.htm](http://www.china.com.cn/aboutchina/zhuanti/09dfgl/2009-11/24/content_18945762.htm).
- [27] 西藏自治区农牧厅. 西藏农牧业概况[EB/OL]. 2012-10-12. [http://xznm.agri.gov.cn/Html/2012\\_10\\_12/2\\_2056\\_2012\\_10\\_12\\_25118.html](http://xznm.agri.gov.cn/Html/2012_10_12/2_2056_2012_10_12_25118.html).
- [28] Shen Weishou, Li Haidong, Sun Ming, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008[J]. *Global and Planetary Change*, 2012(86): 37—44.
- [29] Roy Darwin, Marinos Tsigas, Jan Lewandrowski, et al. World Agriculture and Climate Change Economic Adaptations [R]. Washington: United States Department of Agriculture, 2006.
- [30] 郭小芹, 刘明春. 河西走廊近 40a 气候生产潜力特征研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1323—1329.
- Guo Xiaoqin, Liu Mingchun. Spatiotemporal characteristics of climate productivity potential during last 40 years in the Hexicorridor[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1323—1329. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘树泽, 张宏铭, 蓝鸿第. 作物产量预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [32] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(6): 13—18.
- Fang Shibo. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(6): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李海东. 雅鲁藏布江流域风沙化土地遥感监测与植被恢复研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 22—23.
- Li Haidong. Remote Sensing Monitoring and Vegetation Restoration Experiments on Aeolian Sandy Land in the Yarlung Zangbo River Basin on the Tibetan Plateau [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012: 22—23. (in Chinese with English abstract)
- [34] IPCC. Climate change 2014: impact, adaptation, and vulnerability [M/OL]. *Climate Change and Human Health*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 2014-04-01. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- [35] 钱凤魁, 王文涛, 刘燕华. 农业领域应对气候变化的适应措施与对策[J]. *中国人口资源与环境*, 2014, 24(5): 19—24.
- Qian Fengkui, Wang Wentao, Liu Yanhua. Research of adaptive countermeasures of addressing climate change in agriculture field[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(5): 19—24. (in Chinese with English abstract)

## Response of grain yield in Tibet to climate and cultivated land change during 1985-2010

Yang Chunyan<sup>1,2</sup>, Shen Weishou<sup>3\*</sup>, Li Haidong<sup>3</sup>

(1. School of Information & Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Engineering Research Center on Meteorological Energy Using and Control, Nanjing 210044, China;

3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** With less cultivated land, and sensitive to climate change, grain yield of Tibet is low and unstable, which has become an important factor to affect the social and economic development. In this study, the relationship between Tibet's grain yield and cultivated land during 1985-2010 were analyzed to find the main factors affecting grain yield in the background of climate warming, and the countermeasures and suggestions were put forward to guarantee of grain production in Tibet. Meteorological data were from 38 weather stations in Tibet, grain yield was from 2011 Tibet Automatic Yellow Book, and cultivated land area was from the remote sensing images from multi spectral scanner in 1980, thematic mapper in 1990, enhanced thematic mapper in 2000, and HJ-satellite in 2010. The four series of remote sensing data were corrected before use.



In order to reveal the changes and influencing factors of grain yield, the crop climatic potential productivity was calculated by using Thornthwaite model, and the crop trend production and climate production were separated by exponential curve based on the grain production and the meteorological data and four series of remote sensing data. The trend of climate change was analyzed using climatic trend rate and accumulative anomaly method. With the aid of visual interpretation and land change rate, changes of cultivated land were also discussed. The relationship between grain yield and climate change and the change of cultivated land was explored systematically using grey correlation analysis method. The results showed that: 1) From 1985 to 2010 in Tibet, the average total grain production was  $77.83 \times 10^7$  kg, while average climatic potential productivity and grain production per unit area was  $7419.58 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  and  $1948.93 \text{ kg}/\text{hm}^2$  respectively; Tibet's total grain production, climatic potential productivity and grain production per unit area demonstrated a fluctuating growing trend during the period of 1985-2010; Grain production potential was achieved in an average rate of 25.86%, presenting a gradually increasing trend; Grain production was approaching climatic potential productivity and there was much space for improvement in it; 2) The ratio of climate production to grain production per unit area fluctuated between -10.74% and 8.03% and its variation range showed a decreasing trend while the influence on grain production by climate continued to decline; 3) The average accumulated temperature  $\geq 0^\circ\text{C}$  in Tibet was  $2224.53^\circ\text{C}$ , mean temperature in growing season and precipitation changes were  $11.41^\circ\text{C}$  and  $387.48 \text{ mm}$ , respectively, which showed an increasing trend, while average sunshine hours of growing season was  $1095.45 \text{ h}$ , which tended to decrease; Besides, the turning change of those climate factors appeared in 1994; and 4) Correlation degree between grain production and cultivated land, accumulated temperature  $\geq 0^\circ\text{C}$  and precipitation changed from 0.633 to 1.321; Correlation degree between grain production and mean temperature in growing season and precipitation was 0.595 and 0.641. Cultivated land, accumulated temperature  $\geq 0^\circ\text{C}$  and precipitation in growing season were the most important factors affecting food production. The research can provide valuable information for identification of grain yield and its influencing factors, and to further improve the grain yield and to ensure the sustainable development of social economy in Tibet.

**Keywords:** climate change; grain; remote sensing; cultivated land change; grey correlation analysis; Tibet plateau