

引用格式: 周刊社, 洪健昌, 罗珍, 等. 青藏高原冬虫夏草产区气候变化特征分析[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 164–175. [Zhou K S, Hong J C, Luo Z, et al. Analysis on climate change characteristics in the distribution area of Chinese Caterpillar Fungus (*Ophiocordyceps sinensis*) on Tibet[J]. *Resources Science*, 2019, 41(1): 164–175.] DOI :10.18402/resci.2019.01.15

青藏高原冬虫夏草产区气候变化特征分析

周刊社, 洪健昌, 罗珍, 石磊

(西藏自治区气候中心, 拉萨 850001)

摘要: 了解青藏高原冬虫夏草产区气候变化对当地冬虫夏草资源可持续利用和生态环境保护十分重要。本文利用产区24个气象站1981—2015年的气温、降水、日照资料, 采用线性趋势分析、Mann-Kendall突变检验等方法, 对产区气温、降水和日照的变化时空特征进行了分析, 并集合平均5种气候模式在RCP4.5、RCP8.5两种情景下对产区未来年平均气温和年降水量进行了模拟预估。结果表明: 近35年产区年平均气温表现为明显的升高趋势, 冬春季升温最为显著, 其次为夏秋季; 雨季平均气温升温率小于年平均气温升温率。年和雨季的平均最高气温、平均最低气温均呈显著升高趋势, 绝大部分站点的年、雨季平均最低气温升温率和平均最高气温升温率均明显大于同期平均气温升温率。年降水量大部分站点为增加趋势, 但地区差异性较大; 年平均日照时数和雨季日照时数均表现为明显的减少趋势。预估表明产区21世纪未来不同时段气候均表现为气温升高, 降水增多的暖湿化发展趋势。未来冬虫夏草适宜海拔下限直接抬升将导致适宜区范围缩小, 气候变化将对冬虫夏草的产生和生长造成严重威胁。

关键词: 冬虫夏草; 升温率; Mann-Kendall法; 暖湿化; 青藏高原

DOI :10.18402/resci.2019.01.15

1 引言

青藏高原冬虫夏草主要分布在那曲市、昌都市、林芝市等地, 常见于海拔3000m以上的山地阴坡、半阴坡的灌丛或草甸中。因当地土壤、植被、气候等条件不同, 冬虫夏草生长的海拔高度会有一定差异, 如在那曲市分布海拔一般为4100~5000m^[1], 其中嘉黎县和索县为4100~4800m、那曲县为4500~4900m、聂荣县为4600~5000m。周刊社等^[2]调查发现青藏高原冬虫夏草产区海拔在3000~5000m之间的乡镇占96.1%, 初步认为5000m和3000m是青藏高原冬虫夏草产生的海拔上下限。陈仕江等^[3]认为温度和降雨量是影响冬虫夏草产量的主要气候因素。对比发现青海玉树、云南西北部的冬虫夏草分布海拔范围20世纪80—90年代相对60年代均有所收窄^[4-6]。杨大荣等^[7]发现受全球气候变化和青藏高原生态环境变化的影响, 青藏高原高寒草甸的冬虫

夏草分布格局也出现了明显的变化, 冬虫夏草主产区内核心分布带明显变狭小。据统计, 20世纪50年代以前全国冬虫夏草产量曾达到1000t以上, 60年代初期为5080t, 80年代降至约400t, 到90年代仅为300t^[8], 进入21世纪以来冬虫夏草产量减少更加明显。据中国科学院专家在冬虫夏草研究基地的多年观察发现青藏高原冬虫夏草资源量近几十年大幅减少, 部分破坏严重地区资源量不足30年前的1%~3%^[9]。

冬虫夏草产区面积的缩小以及产量的减少导致冬虫夏草价格居高不下, 气候变化和人为干扰(包括采挖)产生的影响均不可忽视。当前全球气温升高已是不争的事实, IPCC第五次报告显示全球平均地表温度在1880—2012年间升高了0.85℃, 在1901—2012年间升高了0.89℃^[10]; 中国气候变化趋势与全球气候变化趋势一致, 近100年来中国地表

收稿日期: 2018-04-27 修订日期: 2018-11-28

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201849; CCSF201610); 气候变化专项“气候变化对西藏春青稞产量的影响研究”。

作者简介: 周刊社, 男, 陕西周至人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为生态与农业气象, 农业气候资源利用。E-mail: zhoukanshe@163.com

通讯作者: 洪健昌, E-mail: hongjianchang@163.com

2019年1月

年平均气温升高了 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$,略高于同期全球升温幅度的平均值^[11,12];杜军发现1961—2000年青藏高原平均气温升温率为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,明显高于全国和全球^[13]。

Beniston等^[14]发现,瑞士阿尔卑斯山地表气温变化表现出明显的海拔依赖性,即高海拔地区的气候变暖比低海拔地区更为明显,Liu等发现青藏高原地区增暖趋势也存在随海拔高度升高而增加的现象^[15]。受区域增温的影响,同期青藏铁路沿线的多年冻土区活动层厚度呈明显增加趋势,2001—2010年青藏铁路沿线多年冻土区平均气温较1990—2000年升高了约 1.1°C ^[16],杜军等^[17]也发现青藏高原随着海拔升高,最大冻土深度减幅也在加大。预计到21世纪末,全球地表平均气温较1980—1999年增温将达 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ ^[18],徐影等^[19]认为由于人类活动影响,青藏高原未来100年温度变化比全国增幅更大,姜大膀等^[20]也认为对应 2°C 全球变暖中国气候变暖幅度将更大,在青藏高原地区存在一个升温大值区。

以全球变暖为主要特征的气候变化已经对青藏高原脆弱的生态系统造成了严重影响,并受到国际社会的普遍关注。作为青藏高原的重要组成部分,青藏高原未来气候变暖带来的负效应更不可忽视。青藏高原丰富的冬虫夏草资源是产区农牧民的主要经济收入来源,对当地的社会稳定和经济发展影响很大,然而随着气候变化的影响、人们的过量采挖及草原生态的破坏造成冬虫夏草资源量日益枯竭,采挖难度越来越大。调查中发现那曲市冬虫夏草主产区分布在东部的巴青县、索县、比如县、嘉黎县,而那曲市西部的安多县、申扎县、班戈县、尼玛县几乎无冬虫夏草分布,高海拔的阿里地区、林芝市低海拔地区也极少有冬虫夏草分布。冬虫夏草对气候条件特别是对气温、降水、湿度、光照等有强烈的依赖性,温度、水分和日照的微小变化就可能导致冬虫夏草生存微环境的较大改变。在气候变暖背景下,主产区的气候特征和未来气候变化对冬虫夏草分布格局和产量的可能影响都值得重视。因此研究产区气温、降水和日照的变化对冬虫夏草资源可持续利用和生态环境保护十分重要。虽然以前针对冬虫夏草产区的气象要素、土壤、植

被进行了大量调查性研究^[1,21-24],但大多基于单点短期气象要素分析或生境调查,缺乏对产区气候条件的系统性研究;当代对青藏高原降水和气温变化特征研究也不少^[13,25-28],但主要集中在对青藏高原整体气温和降水的研究,而针对产区独特的地理环境气候特征及其变化的研究未见报道。本文尝试分析冬虫夏草产区过去35年和未来的气候变化特征及气候变化对冬虫夏草产生和生长的可能影响,以期初步理清青藏高原冬虫夏草产生的气候背景,为冬虫夏草可持续利用和应对气候变化提供依据。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西藏冬虫夏草广泛分布于高原东部、中部的高山灌丛或高山草甸中,地理位置为 $84^{\circ}6'\text{E}\sim 99^{\circ}6'\text{E}$, $26^{\circ}40'\text{N}\sim 32^{\circ}40'\text{N}$ 之间(图1)。该地区气温低,昼夜温差大,无绝对无霜期,冻土时间长,日照较为充足。

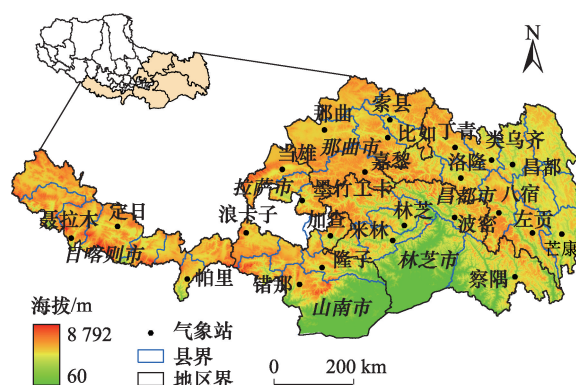


图1 青藏高原冬虫夏草产区海拔分布示意

Figure 1 Sketch map of altitude distribution of *Ophiocordyceps sinensis* in Tibet

2.2 数据来源

本文所使用的高程数据空间分辨率为30m的DEM数据,行政边界数据采用国家基础地理信息中心发布的1:400万西藏行政区划数据,西藏冬虫夏草产区24个气象站1981—2015年降水量、气温、日照时数逐日资料由西藏自治区气象信息网络中心提供,已经过质量控制;CMIP5一系列实验包括对20世纪气候的模拟以及在新的温室气体排放情景下对21世纪气候的预估实验温室气体排放新情景下典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs),RCPs主要包括RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5等4种情景^[29],每种情景都提供了

一种受社会经济条件和气候影响等的排放路径,并给出到2100年相应的辐射强迫值,关于CMIP5更多的实验设计介绍可参考文献[30,31];作为对比标准值的青藏高原冬虫夏草产区1960—1990年气温、降水量栅格数据由 <http://www.worldclim.org/current>^[32] 提供下载。本文采用了参加“国际耦合模式比较计划”(CMIP5)的BBC-CSM1-1、CCSM4、GISS-E2-R、MRI-CGCM3、NorESM1-M等5种大气环流模式模拟在RCP4.5和RCP8.5情景下的未来气候趋势预估数据对产区未来气候进行预估。

2.3 研究方法

2.3.1 气候趋势

按上年12月—2月为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季生成逐季序列;雨季(5—9月)为蝙蝠蛾成虫和幼虫生长发育的主要季节,雨季的气候条件变化直接影响蝙蝠蛾成虫和幼虫的活动。

气温(降水量)的气候倾向率采用一次线性方程表示,即:

$$T = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

式中, T 为气温(降水量); t 为时间; a_0 为常数项; a_1 为线性趋势项, $a_1 \times 10$ 表示气温(降水量)每10a的气候倾向率。

2.3.2 气候突变检验

气候突变是指气候从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)的过程,它表现为气候在时空上从一个统计特征到另一种统计特征的急剧变化^[33]。

常见的检测气候突变方法有Mann-Kendall法、滑动T检验法、小波分析法、Spearman法、Crammer法等。本文利用Mann-Kendall法进行气候突变检测,该方法是世界气象组织推荐并已广泛使用的一种非参数统计检验方法,常用来预测径流、气温、降水等水文气象要素的长期变化趋势。

3 结果分析

3.1 气温变化特征

3.1.1 平均气温变化特征

在全球气候变暖背景下,近35a青藏高原冬虫夏草产区年和雨季平均气温均表现为明显的升高趋势。年平均气温升温率为 $(0.20 \sim 0.59)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (均通过0.05显著性检验),其中主产区的那曲市升温率为 $(0.42 \sim 0.59)^\circ\text{C}/10\text{a}$,昌都市升温率为 $(0.27 \sim 0.49)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图2a);就平均升温率而言,各地市以那曲市和拉萨市升温率最大,均为 $0.50^\circ\text{C}/10\text{a}$,昌都市为 $0.38^\circ\text{C}/10\text{a}$,日喀则市、山南市、林芝市均达到 $0.35^\circ\text{C}/10\text{a}$,总体上产区年平均气温升温率为 $0.39^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。雨季各产区升温率为 $(0.12 \sim 0.53)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图2b),平均为 $0.29^\circ\text{C}/10\text{a}$,雨季升温率明显小于年升温率。

近35a产区季平均气温表现为明显的升高趋势(图略),春季升温率为 $(0.23 \sim 0.52)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$;夏季升温率为 $(0.13 \sim 0.44)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.27^\circ\text{C}/10\text{a}$;秋季升温率为 $(0.12 \sim 0.51)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$;冬季升温率为 $(0.31 \sim 0.96)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.61^\circ\text{C}/10\text{a}$ (均通过0.05显著性检验)。以冬季升温最为明显,其次为春秋季节,夏季升温最小。

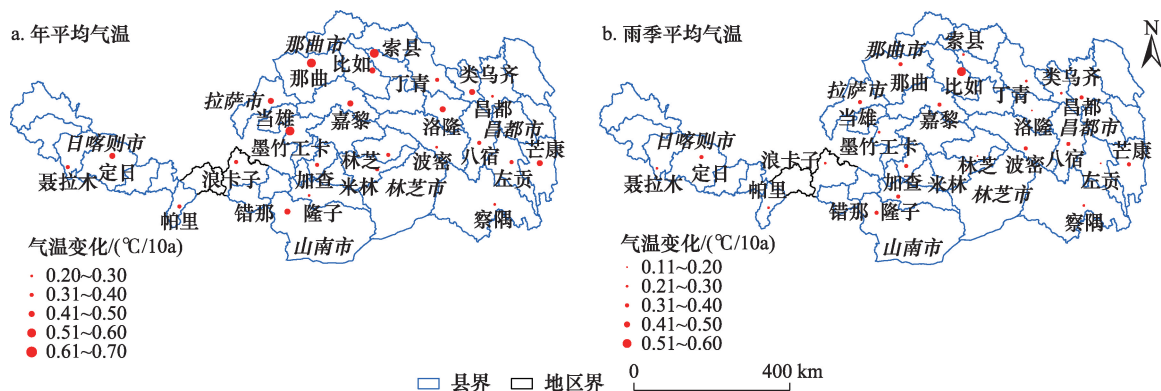


图2 1981—2015年年平均气温和雨季平均气温变化趋势空间分布

Figure 2 Spatial distribution of annual average temperature and average temperature in rainy season variation trends of Tibet from 1981 to 2015

2019年1月

3.1.2 平均最高气温变化特征

近35a青藏高原冬虫夏草产区年和雨季平均最高气温均呈较为明显的升高趋势,各产区年平均最高气温升温率为 $(0.27 \sim 0.75)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图3a),平均为 $0.43^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。以拉萨市最大,为 $0.67^\circ\text{C}/10\text{a}$,林芝市最小,为 $0.33^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。日喀则市、昌都市、山南市、那曲市升温率分别为 $0.35^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.41^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.43^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.52^\circ\text{C}/10\text{a}$,升温率具明显的区域特征。各产区雨季平均最高气温升温率为 $(0.04 \sim 0.57)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图3b),平均为 $0.29^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均最高气温大部分站点也表现为雨季升温率小于年升温率。

近35a产区季平均最高气温也表现为明显的升高趋势(图略),春季升温率为 $(0.15 \sim 0.72)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.38^\circ\text{C}/10\text{a}$;夏季升温率为 $(0.09 \sim 0.54)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.29^\circ\text{C}/10\text{a}$;秋季升温率为 $(0.26 \sim$

$0.83)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.47^\circ\text{C}/10\text{a}$;冬季升温率为 $(0.46 \sim 1.11)^\circ\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.67^\circ\text{C}/10\text{a}$ (各季均通过0.05显著性检验)。平均最高气温升温的季节变化比较明显,以冬季升温最为显著。

3.1.3 平均最低气温变化特征

近35a青藏高原冬虫夏草产区年和雨季平均最低气温呈较为明显的升高趋势,年平均最低气温升温率为 $(0.09 \sim 0.86)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图4a),平均为 $0.50^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。以拉萨市最大,为 $0.65^\circ\text{C}/10\text{a}$,林芝市最小,为 $0.38^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。那曲市、昌都市、日喀则市、山南市升温率分别为 $0.62^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.51^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.44^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.42^\circ\text{C}/10\text{a}$;雨季平均最低气温也呈一致的升高趋势,近35a的升温率为 $(0.12 \sim 0.83)^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图4b),平均为 $0.43^\circ\text{C}/10\text{a}$ (通过0.05以上显著性检验)。年和雨季平均最低气温升温率均明显大于同期平均最

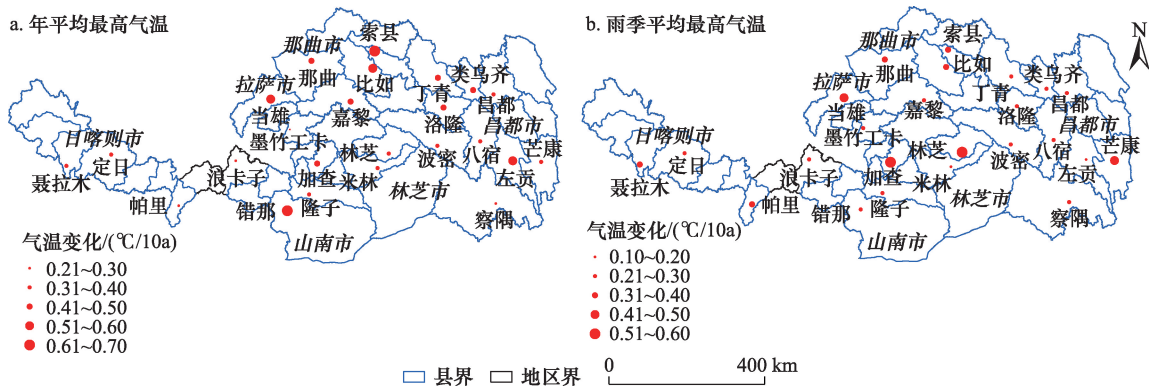


图3 1981—2015年年平均最高气温和雨季平均最高气温变化趋势空间分布

Figure 3 Spatial distribution of annual average maximum temperature and average maximum temperature in rainy season variation trends of Tibet from 1981 to 2015

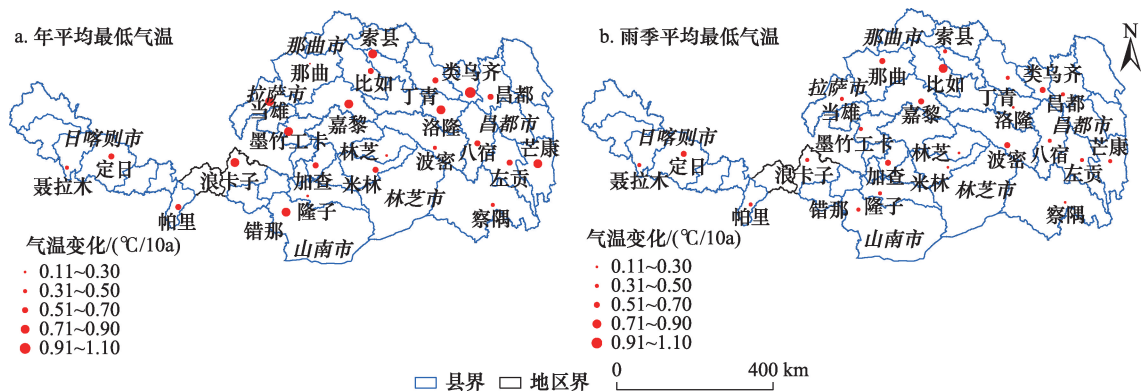


图4 1981—2015年年平均最低气温和雨季平均最低气温变化趋势空间分布

Figure 4 Spatial distribution of annual average minimum temperature and average minimum temperature in rainy season variation trends of Tibet from 1981 to 2015

高气温升温率,升温具有明显的不对称性。

近35a产区季平均最低气温也表现为明显的升高趋势(图略),春季升温率为 $(0.24 \sim 0.93)^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.49^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;夏季升温率为 $(0.14 \sim 0.77)^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.44^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;秋季升温率为 $(0.10 \sim 0.96)^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;冬季升温率为 $(0.01 \sim 1.02)^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,平均为 $0.56^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (各季均通过0.05显著性检验)。以冬春季升温最为明显,其次为夏秋季。

研究发现绝大部分站点的年平均最低气温升温率和年平均最高气温升温率均明显高于年平均气温升温率。年和雨季的平均气温、平均最高气温、平均最低气温均表现为高海拔地区升温率要明显大于低海拔地区。对于极值研究发现,绝大部分站点的最高气温升温率明显大于平均最高气温升温率,最低气温升温率也明显大于平均最低气温升温率,说明该地区的气温变化容易产生极值,极值的产生反应该地区更易受到气候变化的影响。

3.2 降水变化特征

研究发现近35a青藏高原产区年降水量地区差异性比较大,年降水量范围为 $285.5 \sim 894.6\text{mm}$,平均为 542.0mm ,主要产区的年降水量为 $450.0 \sim 600.0\text{mm}$ 。年降水量大部分站点为增加趋势,林芝市大部、聂拉木、洛隆呈减少趋势,减幅为 $(5.6 \sim 41.8)\text{mm}/10\text{a}$,其中察隅和聂拉木减幅最为明显;其他各站表现为不同程度的增加趋势,平均每10a增加 $1.1 \sim 31.2\text{mm}$,以浪卡子、芒康增幅最为显著(通过0.01显著性检验)(图5a)。就地区而言,林芝市减少最明显,那曲市和山南市增加最明显。雨季降水量隆子、浪卡子、米林、昌都呈减少趋势外,其他

地区均为增加趋势,增幅为 $(1.8 \sim 28.9)\text{mm}/10\text{a}$ (图5b),平均增幅为 $11.8\text{mm}/10\text{a}$,各站雨季降水量均达到全年降水量的80%左右。研究发现冬虫夏草产区季降水量中春季和夏季为增加趋势,秋季和冬季为减少趋势(图略)。其中春季各站点增幅为 $(0.5 \sim 12.5)\text{mm}/10\text{a}$,夏季大部分站点增幅为 $(2.5 \sim 32.7)\text{mm}/10\text{a}$,秋季大部分站点减幅为 $(0.5 \sim 21.2)\text{mm}/10\text{a}$,冬季大部分站点减幅为 $(0.1 \sim 13.9)\text{mm}/10\text{a}$,绝大部分站点冬季降水量只占全年降水量的1%~5%。

3.3 日照变化特征

近35a西藏冬虫夏草产区大部分站点的年平均日照时数表现为明显的减少趋势,昌都市大部、定日、索县、墨竹工卡、加查、波密、察隅等地为增加趋势,增幅为 $(3.1 \sim 60.0)\text{h}/10\text{a}$,其他地区减幅为 $(9.0 \sim 86.9)\text{h}/10\text{a}$ (图6a),整个产区平均减幅为 $6.5\text{h}/10\text{a}$ 。雨季除定日、帕里、比如、丁青、八宿增幅为 $(8.8 \sim 23.2)\text{h}/10\text{a}$ 外,其他各产区减幅为 $(1.2 \sim 61.8)\text{h}/10\text{a}$ (图6b),雨季日照时数减少趋势较年日照时数减少趋势明显。从季日照变化趋势来看(图略),各地平均日照冬季是增加趋势,增幅为 $5.4\text{h}/10\text{a}$,其他各季节均为减少趋势,夏季减幅为 $12.4\text{h}/10\text{a}$,春季减幅为 $4.8\text{h}/10\text{a}$,秋季减幅为 $1.7\text{h}/10\text{a}$ 。冬季日照时数增加最为明显,春夏季减幅最为明显。

3.4 气候突变检验

采用Mann-Kendall突变检验分析发现,青藏高原冬虫夏草产区年和雨季平均气温均发生过突变,年平均气温从1984年开始升高,1997年发生突变,到1998年上升趋势达到显著水平,从2002年开始

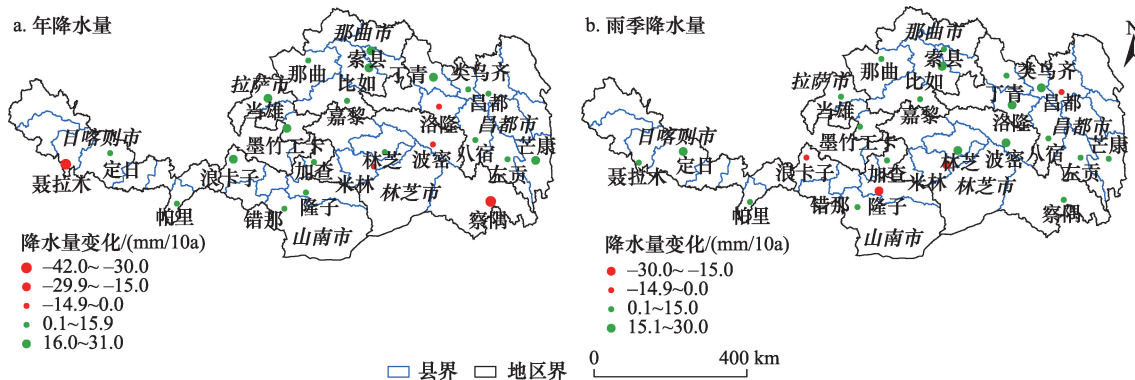


图5 1981—2015年年降水量和雨季降水量变化趋势空间分布

Figure 5 Spatial distribution of annual precipitation and precipitation in rainy season variation trends of Tibet from 1981 to 2015

2019年1月

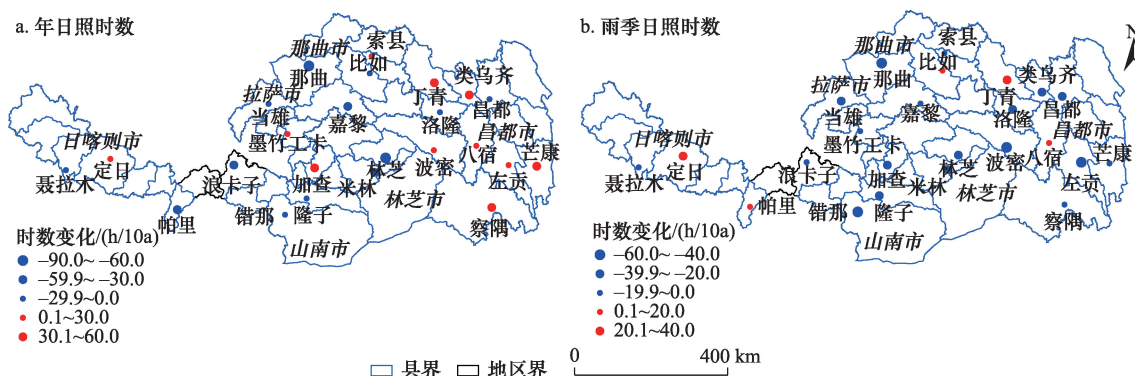


图6 1981—2015年年日照时数和雨季日照时数变化趋势空间分布

Figure 6 Spatial distribution of annual sunshine hours and sunshine hours in rainy season variation trends of Tibet from 1981 to 2015

上升趋势达到极显著水平(图7a);雨季平均气温从1987年开始升高,2000年发生突变,次年上升趋势达到显著水平,从2003年开始上升趋势达到极显著水平(图7b)。雨季平均气温突变要晚于年平均气温突变,进入21世纪以来,年平均气温和雨季平均气温升温趋势均更加明显。从图可以看出,年降水量和雨季降水量由于UF和UB存在多个明显的交叉点,不能确定这些交叉点为突变点,初步判断年和雨季降水量均在1983年有可能发生突变,经过向前延长观测年份判断没有发生突变;1984年开始UF和UB曲线基本上都是在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界线内(图7c和图7d),年份间有波动,变化趋势不显著,不存在突变现象。年日照时数在1984年前呈波浪式上升趋势,从1986年开始呈减少趋势,2004年达到最低点,从2005年开始减少趋势有所减缓(图7e),雨季日照时数与年日照时数变化趋势非常相似(图7f)。

3.5 产区未来气候趋势预估

本文主要分析RCP4.5(中等辐射强迫情景:到了2100年辐射强迫稳定在约 $4.5\text{W}/\text{m}^2$,相当于 CO_2 浓度达到了650ppm)和RCP8.5(高辐射强迫情景:到了2100年辐射强迫大于 $8.5\text{W}/\text{m}^2$,相当于 CO_2 浓度超过了1370ppm)情景下西藏21世纪中期(2041—2060年)以及后期(2061—2080年)的气温和降水的变化特征。鉴于研究^[34]认为在青藏高原地区多模式等权重集合平均和中位数集合方案都要优于大多数单个模式的模拟性能,而且等权重集合平均方案要优于中位数集合方案。本文在CMIP5气候模式中选了BBC-CSM1-1、CCSM4、GISS-E2-

R、MRI-CGCM3、NorESM1-M共5种模式^[35],采用等权重集合平均方案处理以上5个模式的预测结果,对21世纪青藏高原冬虫夏草产区的年平均气温和年降水趋势进行了预估。

3.5.1 年平均气温预估

在RCP4.5和RCP8.5两种情景下,多模式集合计算的产区21世纪不同时段年平均气温相对于气候基准时段(1960—1990年)均呈明显的升高趋势。在RCP4.5情景下,2041—2060年,产区年平均气温增幅为 $1.9\sim 2.6^\circ\text{C}$,其中那曲市、昌都市和日喀则市西部的部分地区增幅达 $2.3\sim 2.6^\circ\text{C}$,其余大部分地区增幅约为 $1.9\sim 2.2^\circ\text{C}$;2061—2080年,产区大部分地区年平均气温增幅为 $2.3\sim 2.9^\circ\text{C}$,其中那曲市东部、昌都市西部和日喀则市西部增幅达 $2.7\sim 2.9^\circ\text{C}$,林芝市南部和山南市南部地区增幅为 $1.9\sim 2.2^\circ\text{C}$ 。相对于气候基准时段,RCP8.5情景下,2041—2060年,产区绝大部分地区年平均气温增幅为 $2.3\sim 2.9^\circ\text{C}$,南部边缘地区增幅也能达到 $2.3\sim 2.6^\circ\text{C}$;2061—2080年,产区大部分地区年平均气温增幅为 $3.4\sim 4.3^\circ\text{C}$,主要产区增幅达 $3.9\sim 4.3^\circ\text{C}$,林芝市南部和南部边缘地区增幅也可达到 $2.8\sim 3.8^\circ\text{C}$ 。以上二种情景二个时期年平均气温距平变化见图8(第171页),就此趋势而言,到2100年增加幅度会更大。高原的南部及南侧由于西南季风带来的大量水汽的影响,气温递减率 γ 在 $0.55^\circ\text{C}/100\text{m}$ 以下;高原北部及北侧远离水汽源地,空气干燥,气温递减率 γ 在 $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ 以上。冬虫夏草主要生长在高原北部,按照 γ 变化规律, γ 取值为 $0.60^\circ\text{C}/100\text{m}$ 进行估值计算,预计在21世纪末产区适宜温度区相对于基准时段会抬升 $500\sim$

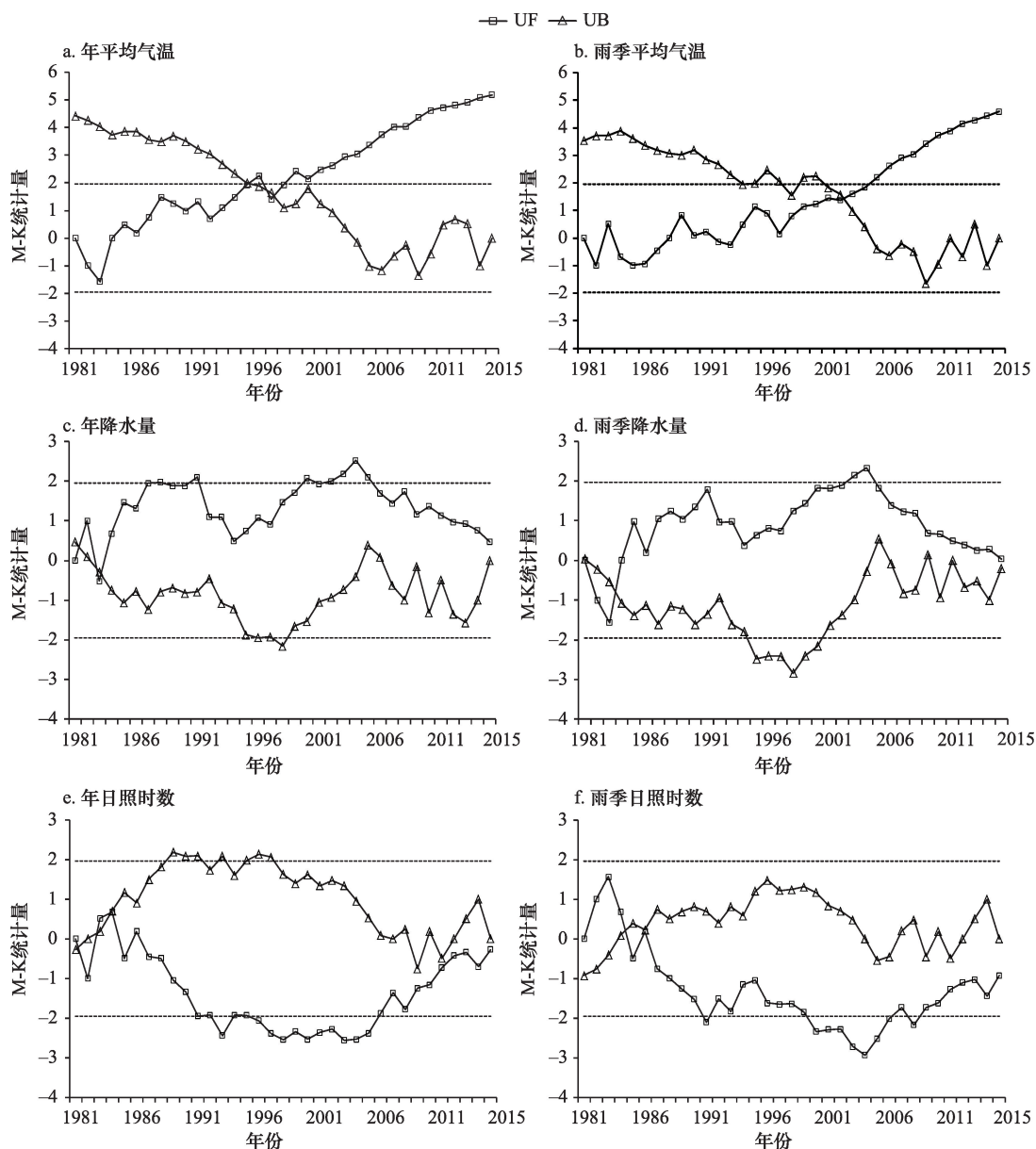


图7 1981—2015年年和雨季平均气温、降水量和日照时数M-K统计量曲线

Figure 7 M-K statistics curve of average temperature and precipitation and sunshine hours in the year and in rainy season of Tibet from 1981 to 2015

600m。

3.5.2 年降水量预估

多模式集合计算的年降水量相对于气候基准时段(1960—1990年)均呈增加趋势,但存在较大的区域空间差异。年降水量在RCP4.5情景下,2041—2060年,产区大部分地区可能增加4%~10%,那曲市东部和昌都市西部的主产区增加4%~5%,日喀则市西部增加11%~15%,其他地区增加6%~10%(图9a);2061—2080年,除日喀则市西部增加11%~15%外,产区大部分地区降水量增加6%~

10%(图9b)。在RCP8.5情景下,2041—2060年,产区绝大部分地区降水量增加4%~10%,日喀则市西部增加11%~15%(图9c);2061—2080年,产区绝大部分地区增加6%~15%,日喀则市东部增加11%~15%、日喀则市西部增加可达16%~20%(图9d)。整体上2061—2080年较2041—2060年各地降水均有所增加。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

2019年1月

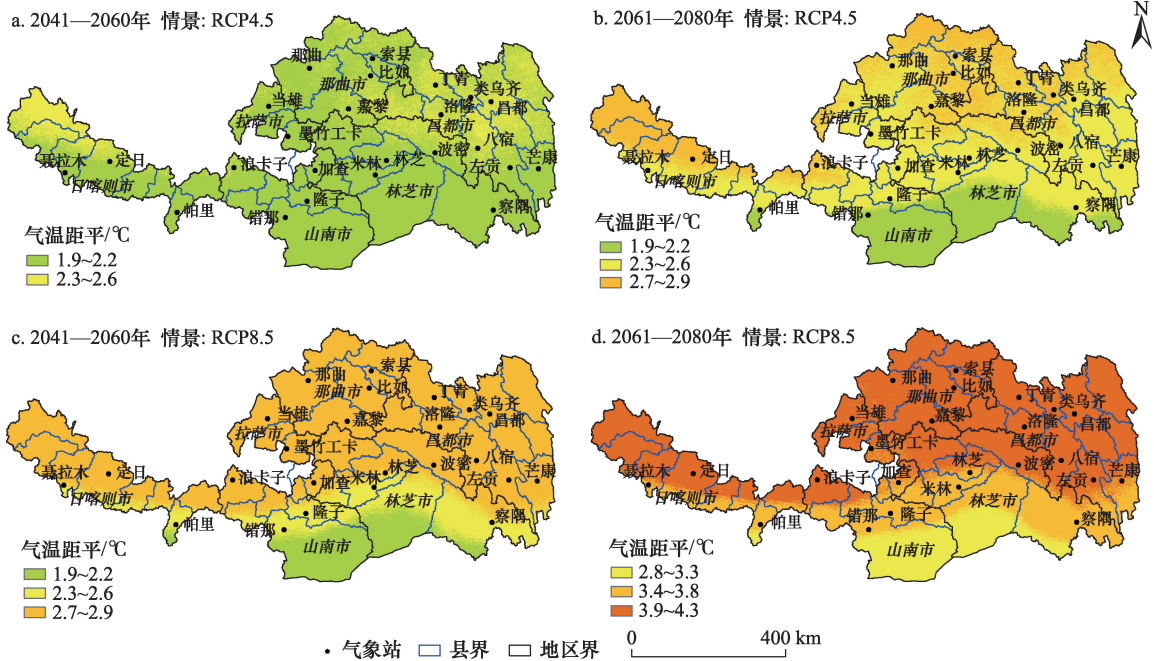


图8 模拟21世纪不同时期相对于标准值(1960—1990年)年平均气温距平变化空间分布

Figure 8 Spatial distribution of annual average air temperature anomaly changes of Tibet in different periods of the 21st century

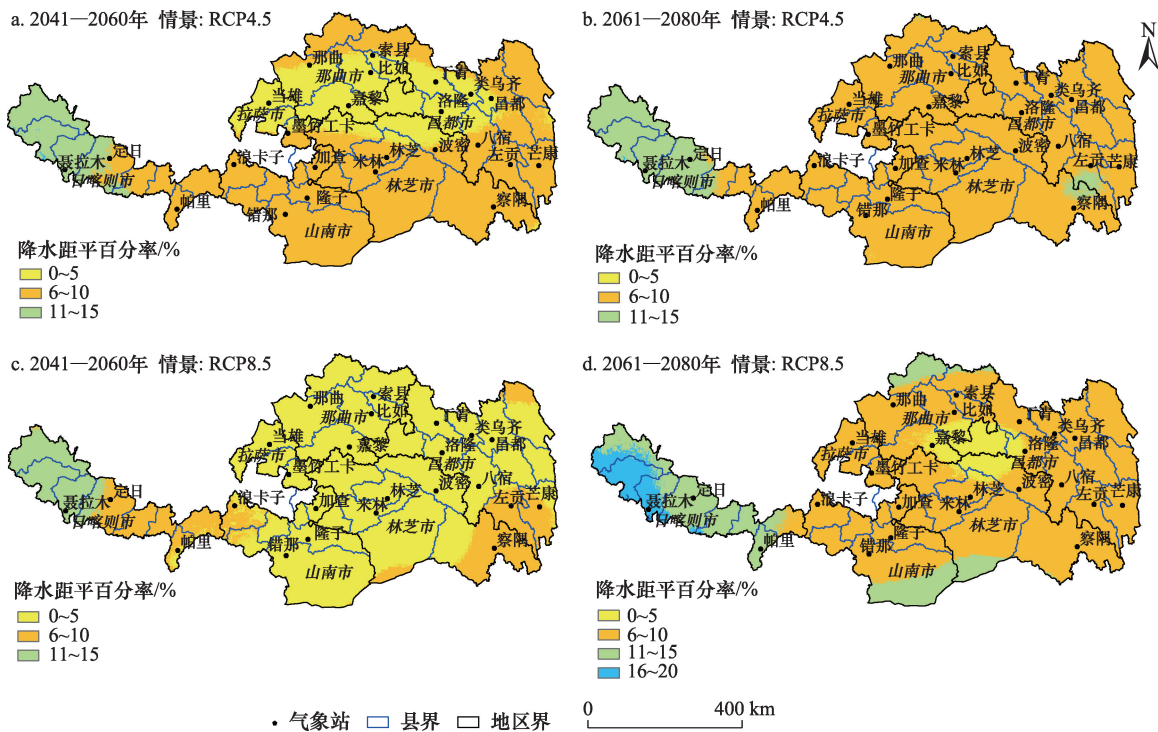


图9 模拟21世纪不同时期相对于标准值(1960—1990年)年降水距平百分率变化空间分布

Figure 9 Spatial distribution of annual precipitation anomaly percentage changes of Tibet in different periods of the 21st century

(1)在全球气候变暖背景下,近35a青藏高原冬虫夏草各产区年平均气温均显著升高,升温率为 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;冬春季升温最为显著,其次为夏秋季。

雨季平均气温也呈显著升高趋势,且雨季升温率小于年升温率。年和雨季平均最高气温和平均最低气温也均呈显著升高趋势,年平均最低气温升温率

明显大于年平均最高气温升温率,年和雨季的平均气温、平均最高气温、平均最低气温升温率均表现为高海拔地区明显大于低海拔地区。产区年平均降水量地区差异较大,雨季降水量约占全年降水量的80%,年和雨季降水量大部分站点为增加趋势;大部分站点季降水量春夏季为增加趋势,秋冬季为减少趋势。从20世纪80年代开始至今,产区日照时数大部分站点呈减少趋势,21世纪初期减少程度有所减缓。近35a青藏高原冬虫夏草各产区气候变暖明显,降水增加,该地区趋向暖湿化。

(2)青藏高原冬虫夏草产区年和雨季平均气温均发生过突变,年平均气温1997年发生突变,雨季平均气温在2000年发生突变,雨季突变时间较年突变有所滞后,进入21世纪年平均气温和雨季平均气温升高趋势更加明显;年降水和雨季降水以及同期的日照在研究年份均没有发生突变。

(3)气候预估显示冬虫夏草产区21世纪不同时段气候均表现为气温升高,降水增多的暖湿化发展趋势特征,将维持或加剧前期的暖湿化状态。相对于气候基准时段(1960—1990年),预估在RCP4.5情景下,2041—2060年产区大部分地区年平均气温可能升高1.9~2.6℃,年降水量增加4%~10%;2061—2080年产区大部分地区年平均气温可能升高2.3~2.9℃,年降水量增加6%~10%。在RCP8.5情景下,2041—2060年产区绝大部分地区年平均气温升高2.3~2.9℃,年降水量增加4%~10%;2061—2080年产区大部分地区年平均气温升高3.4~4.3℃,年降水量增加6%~15%。

4.2 讨论

从近35年青藏高原冬虫夏草产区的气候变化特征及未来气候预估结果来看,气温升高和降水增加是大概率事件,年际间可能会存在波动,但气候的暖湿化趋势较为明显。21世纪青藏高原冬虫夏草产区大部分区域年平均气温升高和年降水增加均为正趋势,印证了姜大膀和富元海^[9]在青藏高原地区存在一个升温大值区,降水量增加百分率要略高于中国区域年平均值的说法。本研究利用5个模式集合平均模拟未来产区的气温和降水结果与胡苓等^[35]研究在相同情景下中期和末期年平均气温升高和年降水增加幅度接近,但要略大于全国值。需

要清楚的是气候模式对青藏高原气候的模拟能力仍有许多不足之处,如对地表气温模拟偏冷以及对降水的高估等^[34],并且预估结果在气候模式间存在一定差异,也存在一些不确定性,但全球变暖背景下青藏高原变暖的趋势是很难改变的。

西藏高原冬虫夏草产区21世纪不同时段气候趋向暖湿化,气候变暖会导致冰川融化加速、冻土层变浅和雪线抬升,产区生态环境将发生一定的变化,冬虫夏草生长适宜温度地域范围向高海拔移动,作为生长在西藏高原上的冬虫夏草资源必将受到气候变化的影响,冬虫夏草为适应气候变化产区空间分布格局将发生变化。与其相关的寄主昆虫、取食植物易受到气温、降水、日照、土壤温湿度等气候要素的制约,植被和气候的变化直接影响冬虫夏草的食物和生存环境。夏季降水对冬虫夏草影响最大,但冬季的降雪作用也不可忽视,降雪的多少对冬虫夏草越冬和来年冬虫夏草产量影响也很大,也会直接影响冬虫夏草出土时间。

初步认为未来降水增加可能对降水量少的西部地区是有利的,利于土壤湿度的保持和植物生长,可为冬虫夏草成虫和幼虫提供更多的食物资源,气温升高也能提高寄主昆虫蝙蝠蛾成虫和幼虫发育速度;未来气候导致降水量多的东部地区由于降水过多不利于蝙蝠蛾成虫和幼虫的生长发育,也不利于冬虫夏草的产生和生长。整体上,冬虫夏草产区降水量增大可能伴随阴雨天气增多,日照时间减少、光照减弱对冬虫夏草产生和发育可能不利。青藏高原冬虫夏草宏观产量的变化需要更多的科学调查和统计,气候变化对冬虫夏草分布范围及产量空间分布格局的影响需要更多的长期连续定位观测。随着全球变暖,雪线上升,会使仅能在高寒条件下繁衍的冬虫夏草适宜生长环境逐渐缩小,冬虫夏草自然资源受到严重威胁。人为干扰造成土壤结构和植被破坏,减少了蝙蝠蛾幼虫的食物,导致虫源衰退。如果冬虫夏草产区面积变小,资源数量会更加匮乏,冬虫夏草采集会更加困难。冬虫夏草的产生不但与当地的植被、土壤有密切关系,与气候条件也密不可分,该地区的暖湿化趋势结合日照减少对冬虫夏草产生的影响值得进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 陈仕江, 尹定华, 丹增, 等. 中国西藏那曲冬虫夏草的生态调查[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(4): 289-296. [Chen S J, Yin D H, Dan Z, *et al.* Ecological investigation of Chinese Caterpillar Fungus(*Cordyceps sinensis*) in Naqu Tibet China[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2001, 23(4): 289-296.]
- [2] 周刊社, 张建春, 黄晓清, 等. 青藏高原冬虫夏草资源适性区划分分析[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2768-2779. [Zhou K S, Zhang J C, Huang X Q, *et al.* Suitability and regionalization of *Cordyceps sinensis* in Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2768-2779.]
- [3] 陈仕江, 尹定华, 李黎, 等. 西藏那曲地区冬虫夏草资源及分布[J]. 中药材, 2000, 23(11): 673-675. [Chen S J, Yin D H, Li L, *et al.* Resources and distribution of *Cordyceps sinensis* in Naqu Tibet [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2000, 23(11): 673-675.]
- [4] 沈发荣, 杨跃雄, 杨大荣, 等. 云南的冬虫夏草初步研究[J]. 微生物学通报, 1988(2): 3-5. [Shen F R, Yang Y X, Yang D R, *et al.* Preliminary investigation of *Cordyceps sinensis* in Yunnan[J]. *Microbiology*, 1988(2): 3-5.]
- [5] 刁治民. 青海冬虫夏草资源及生物学特性的初步研究[J]. 生物学杂志, 1996, 13(2): 21-22. [Diao Z M. Preliminary studies of resource and biology of *Cordyceps sinensis* in Qinghai Province[J]. *Journal of Biology*, 1996, 13(2): 21-22.]
- [6] 刘兆红, 李玉玲. 玉树州冬虫夏草资源与分布[J]. 草业与畜牧, 2006(12): 34-36. [Liu Z H, Liu Y L. Resources and distribution of *Cordyceps sinensis* in Yushu[J]. *Prataculture and Animal Husbandry*, 2006, (12): 34-36.]
- [7] 杨大荣, 彭艳琼, 陈吉岳, 等. 中国冬虫夏草分布格局与环境变化对其分布的影响[J]. 中国草地学报, 2010, 增刊: 22-27. [Yang D R, Peng Y Q, Chen J Y, *et al.* The distribution pattern of *Cordyceps sinensis* in China and the response to environmental changes [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(S1), 22-27.]
- [8] 陈仕江, 钟国跃, 马开森, 等. 冬虫夏草资源可持续利用的思考[J]. 中国草地学报, 2010, 32(s1): 44-47. [Chen S J, Zhong G Y, Ma K S, *et al.* Thinking of the sustainable utilization of *Cordyceps sinensis* resources[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(s1): 44-47.]
- [9] 周东平. 经济聚焦: 冬虫夏草, 如何把“根”留住[EB/OL]. 人民网-《人民日报》, 2010-7-27. <http://cpc.people.com.cn/GB/64093/64387/12256253.html>. [Zhou D P. *Cordyceps sinensis* significantly reduced in Qinghai-Tibet Plateau, how to retain the "root"[EB/OL], 2010-7-27. <http://cpc.people.com.cn/GB/64093/64387/12256253.html>.]
- [10] Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [11] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 791-798. [Tang G L, Ren G Y. Re-analysis of Surface Air Temperature Change of the Last 100 Years over China[J]. *Climatic & Environmental Research*, 2005, 10(4): 791-798.]
- [12] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 3(1): 1-5. [Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, *et al.* National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 3(1): 1-5.]
- [13] 杜军. 青藏高原近40年的气温变化[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 682-690. [Du J. Change of temperature in Tibetan Plateau from 1961 to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 682-690.]
- [14] Beniston M, Rebetez M. Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979-1993[J]. *Theoretical and Applied Climatology*. 1996, 53: 231-244.
- [15] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [16] 中国气象局气候变化中心. 气候变化监测公报[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 63-65. [Climate change center of China meteorological administration. Climate change monitoring bulletin[M]. Beijing: Science Press, 2016: 63-65.]
- [17] 杜军, 建军, 洪健昌, 等. 1961—2010年西藏季节性冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 512-521. [Du J, Jian J, Hong J C, *et al.* Response of seasonal frozen soil to climate change on Tibet region from 1961 to 2010[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2012, 34(3): 512-521.]
- [18] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [19] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 451-457. [Xu Y, Ding Y H, Li D L. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st Century[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 451-457.]
- [20] 姜大膀, 富元海. 2℃全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 234-246. [Jiang D B, Fu Y H. Climate change over China with a 2℃global warming[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(2): 234-246.]
- [21] 郭相, 刘蓓, 马绍宾, 等. 云南冬虫夏草生态环境调查及生物学特性分析[J]. 中国食用菌, 2008, 27(6): 8-11. [Guo X, Liu B, Ma S B, *et al.* The ecological environmental investigation and biological characteristic analysis of *Cordyceps sinensis* in Yunnan Province[J]. *Edible Fungi of China*, 2008, 27(6): 8-11.]
- [22] 李晖, 王立辉. 西藏冬虫夏草生境的气候[J]. 西藏科技, 2011(6): 68-71. [Li H, Wang L H. The climate of Chinese Caterpillar Fungus in Tibet[J]. *Tibet Science and Technology*, 2011(6): 68-71.]
- [23] 张古忍, 余俊锋, 吴光国, 等. 冬虫夏草发生的影响因子[J]. 生态

- 学报, 2011, 31(14): 4117–4125. [Zhang G R, Yu J F, WU G G, *et al.* Factors influencing the occurrence of *Ophiocordyceps sinensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 4117–4125.]
- [24] 于斌, 冯凤英, 梁留科, 等. 冬虫夏草的生境及其氨基酸含量分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 791–796. [Yu B, Feng F Y, Liang L K, *et al.* Analysis on habitat and amino acid content of *Cordyceps sinensis*[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(5): 791–796.]
- [25] 杜军. 青藏高原最高、最低气温的非对称变化[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 437–444. [Du J. Using the data of monthly mean temperature, maximum and minimum temperature in Tibetan Plateau from 1971 to 2000[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(4): 437–444.]
- [26] 杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 375–382. [Du J, Ma Y C. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 375–382.]
- [27] 张核真, 唐小萍, 普布卓玛. 近46年青藏高原昼夜降水变化趋势[J]. 气象科技, 2010, 38(2): 205–208. [Zhang H Z, Tang X P, Pu B Z M. Trends of day/night precipitation in Tibet Plateau in recent 46 years[J]. *Meteorological Science & Technology*, 2010, 38(2): 205–208.]
- [28] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 青藏高原近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 C Y, Shen W S, Lin N F. Temp-spatial changes of temperature and precipitation over the Tibet Plateau during the last 50 years[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2013, 27(12): 167–172.]
- [29] Vuuren D P V, Edmonds J, Kainuma M, *et al.* The representative concentration pathways: an overview[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1–2): 5–31.
- [30] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 93(4): 485–498.
- [31] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *Nature*, 2010, 463: 747–756.
- [32] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965–1978.
- [33] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482–493. [Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482–493.]
- [34] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 924–938. [Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 924–938.]

[35] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果[J]. 大气科学, 2015, 39 (2): 260–270. [Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Climate change projection on the Tibetan Plateau: re-

sults of CMIP5 models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(2): 260–270.]

Analysis on climate change characteristics in the distribution area of Chinese Caterpillar Fungus (*Ophiocordyceps sinensis*) on Tibet

ZHOU Kanshe, HONG Jianchang, LUO Zhen, SHI Lei

(Tibet Climate Center, Lhasa 850001, China)

Abstract: It is very important to understand the climate change about distribution of Chinese caterpillar fungus for the local ecological environment protection and the sustainable use of *Ophiocordyceps sinensis* in Tibet. In this paper, temperature, precipitation and sunshine hours data of 24 weather stations in the distribution area from 1981 to 2015 were analyzed with linear trend analysis, Mann-Kendall break detector based on the average annual temperature, average rainy season temperature, annual precipitation and rainy season precipitation and other data. Climate model simulation was used to estimate average annual temperature and annual precipitation in the future under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in the distribution area. The results showed that the average annual temperature of *O. sinensis* in Tibet has been increasing significantly, and the warming rate in the rainy season is lower than the annual warming rate. The warming is more significant in winter or spring than summer and autumn. Simultaneously, the average maximum temperature and average minimum temperature in the annual and rainy seasons showed a significant increase trend, and the warming rate had obvious regional characteristics. The increase rates of average annual minimum temperature and average annual maximum temperature in most stations are significantly greater than the increase rate of average annual temperature. The annual rainfall is increasing at most sites, but there are large regional differences, and it was found that the annual average sunshine hours and the rainy season hours showed significant reduction trend. It is estimated that the temperature in different areas in this century will increase significantly and precipitation will increase in different periods in the future. With the local climate warming and humidity, the suitable range of elevation of *O. sinensis* will rise. However, There is no suitable living condition for it, the lower limit of elevation will rise directly, and the range of suitable *O. sinensis* will be reduced to pose a serious threat to the inducement and growth of *O. sinensis*.

Key words: Chinese Caterpillar Fungus; warming rate; Mann-Kendall method; warm and humid; Tibet