

近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响*

赵雪雁 王伟军 万文玉 李 花

(西北师范大学地理与环境科学学院 兰州 730070)

摘 要 基于青藏高原及周边 106 个气象站近 50 年的平均气温、降水量及日照时数等气象观测数据, 分析了青藏高原区 1965 年以来的气候变化趋势以及青稞生长季及关键生长期的气候变化趋势, 并采用线性倾向估计方法、Thornthwaite Memorial 模型、ArcGIS 和 SPSS 技术分析了青藏高原青稞的气候生产潜力及其时空变化特征, 探讨了青藏高原近 50 年气候变化对青稞发育过程和产量的影响机理及各气象要素对青稞气候生产潜力的影响。结果发现: 1) 近 50 年来, 青藏高原区气温和降水均呈上升趋势($0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $7.8\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 且气温上升较显著, 降水增加较缓, 而日照时数呈波动下降趋势($16.9\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$); 2) 青藏高原青稞生长季气温、降水均呈上升趋势($0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $7.2\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 但日照时数呈下降趋势($15\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 其中高原北部地区增温幅度较大, 而中部地区降水增加显著, 高原东北部日照时数下降较为明显; 3) 青藏高原青稞气候生产潜力总体呈上升趋势($136.7\text{ kg}\cdot \text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 其中高原中部增加较显著, 高原东南部边缘、青海柴达木北部、西藏西北部呈下降趋势; 4) 降水、气温均与青稞气候生产潜力呈显著正相关, 但日照时数与其呈负相关, 其中, 降水是影响青稞生长季和关键生长期气候生产潜力最为关键的因素, 气温影响次之。基于此, 就如何利用青藏高原青稞气候生产潜力的变化特点, 为提高该区青稞的实际产量提出了一系列建议措施。

关键词 青藏高原 气候变化 青稞 气象因子 生长季 生产潜力

中图分类号: P467; S162.5+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2015)10-1329-10

Influence of climate change on potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years

ZHAO Xueyan, WANG Weijun, WAN Wenyu, LI Hua

(College of Geographical and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract This paper mainly analyzed climate trend during growth and crucial growth periods of naked barley in the Tibetan Plateau from 1965 to 2013. The study used average temperature, precipitation, sunshine duration and other meteorological data from 106 meteorological stations allocated in the Tibetan Plateau for the past 50 years. In the paper, tendency analysis, Thornthwaite Memorial model, geographical information system (GIS), statistical product and service solution (SPSS) techniques were used to analyze potential climate productivity of naked barley. Then the features of temporal and spatial variations and the effects of climate change on the development and yield of naked barley as well as the effects of various meteorological factors on the climate potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years were analyzed. The results showed, 1) there was an increasing trend in temperature ($0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$) and precipitation ($7.8\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$) in the Tibetan Plateau in the past 50 years. While temperature increased significantly, the increase in precipitation was not significant. Also there was an obvious decrease in sunshine duration ($16.9\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$). 2) While temperature ($0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$) and precipitation ($7.2\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$) increased during naked barley growth period in the Tibetan Plateau, sunshine duration ($15\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$) significantly decreased during naked barley growing season. There was an obvious warming tendency in the northern zone of the Tibetan Plateau, significant increase in precipitation in the central region of the Tibetan Plateau and then an obvious decline in sunshine duration in the northeast part of the Tibetan Plateau. 3) Climate potential productivity of naked barley increased in the Tibetan Plateau ($136.7\text{ kg}\cdot \text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$) from 1965 to 2013. The magnitude of increase was larger for the central

* 国家自然科学基金项目(41361106)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0910)和甘肃省高校基本科研业务费项目资助
赵雪雁, 主要从事生态经济研究。E-mail: xbzhaoxy@163.com

收稿日期: 2015-05-11 接受日期: 2015-08-03

region than for other regions of the Tibetan Plateau. However, there was a decreasing trend in climate potential productivity of naked barley in the southeastern edge of the plateau, the northern part of Qaidam Basin in Qinghai Province and the northwestern region of Tibet. 4) Precipitation and temperature had significantly positive correlation with climate potential productivity of naked barley. Conversely, sunshine duration was negatively correlated with climate potential productivity of naked barley. Precipitation was the most critical factor affecting climate potential productivity of naked barley during the growing season and the key growth stages, followed by temperature. Finally, the study proposed measures to use of climatic factors to enhance climate potential productivity of naked barley.

Keywords Tibetan Plateau; Climate change; Naked barley; Meteorological factors; Growth period; Potential productivity

(Received May 11, 2015; accepted Aug. 3, 2015)

气候变化问题引起国际社会广泛关注, 尤其全球变暖已成为国际社会关注的焦点^[1]。在过去 100 a, 全球地表温度平均上升 0.74 °C, 据估计到 2100 年不同地区温度将上升 0.3~4.8 °C^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告称: 全球已经并将持续变暖, 且变动幅度比我们之前认识到的更加严重, 由此引发的极端天气事件发生频率和强度均有增无减, 给人类经济、社会和可持续发展带来巨大压力。目前, 虽然气候变化本身及其对各领域具体影响尚未被确切评估, 但学术界已经达成一个基本共识: 气候变化必将影响农业, 气候变化背景下自然灾害和极端天气事件增多等问题可能会使农业生产相当脆弱^[3-6], 中国农业也将面临更加严峻的挑战, 这将对国家粮食安全带来严重威胁。

青藏高原作为全球气候变化的“启动器”和“调节区”, 气候变化不仅直接影响当地资源开发利用和经济建设, 而且对全国乃至全球气候变化及生态平衡起着极其重要的作用^[7]。该区气候变化已得到学术界的广泛关注, 已有研究多集中于气温、降水、蒸散量等气候要素的整体变化趋势或高原总体气候变化特征, 而作物对气候变化响应方面的研究相对较少。青稞(*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.)作为青藏高原重要的粮食作物, 种植面积约占该区粮食作物种植面积的43%, 主产区位于中国西藏、青海、四川、云南等地, 其中, 西藏青稞种植面积占到全区的57%。青稞不仅是最能适应青藏高原自然环境的优势作物和藏民族赖以生存繁衍的基本口粮作物, 也是我国最重要的杂粮作物之一^[8]。近年来有关青稞方面的研究主要集中在青稞的生理特性、营养价值、药用价值等方面, 而对青稞发育过程和产量的影响机理方面研究极少, 因此研究气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响对青稞实际生产和科学研究具有非常重要的意义。青稞生产的稳定与发展不仅关系到藏区群众的温饱 and 致富, 而且关

系到我国社会的繁荣与稳定。同时作为中国青稞的主产区和特色粮食基地, 探讨气候变化对青稞生长发育过程和产量的影响机理对保障国家粮食安全也具有举足轻重的作用。

为了解气候变化对青藏高原青稞发育过程和产量的影响机理, 辨明各种气象要素对青稞气候生产潜力的影响程度, 寻求青稞生产面临的主导限制因素, 本文基于青藏高原及周边 106 个气象站点 1965—2013 年气象数据, 采用数理统计方法分析了研究区气候变化趋势, 利用 Thornthwaite Memorial 模型和 GIS 技术分析青稞生长季气候生产潜力的时空变化特征, 旨在为青藏高原青稞种植提供可靠的依据和借鉴。

1 研究区概况、数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原区是全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元, 具有独特的自然环境和空间分异规律, 受大气环流和高原地势格局的制约, 它形成了独特的水热状况地域组合, 呈现出从东南温暖湿润向西北寒冷干旱的变化。平均海拔 4 000~5 000 m, 有“世界屋脊”和“第三极”之称, 是亚洲许多大河的发源地^[9]。本文所指的青藏高原区包括我国的西藏自治区、青海省、甘肃省甘南藏族自治州、四川省阿坝与甘孜藏族自治州, 该区种植的农作物主要包括青稞、小麦(*Triticum aestivum* Linn.)、玉米(*Zea mays* Linn.)等, 其中青稞种植面积约占粮食作物种植面积的 43%。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)地面气候资料月、日值数据集和农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集。选取了青藏高原及周边 106 个地面气象观测站(图 1)1965—2013 年的逐日温度、降水量、日照时数以及青稞播种、出苗、分蘖、拔节、抽穗、成熟期等各阶段的物候期数据进行分析。

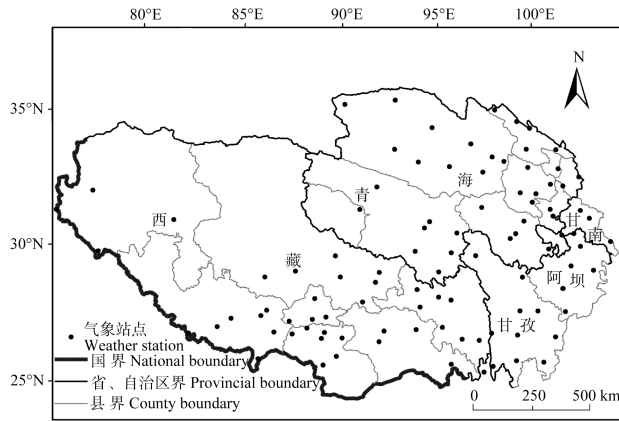


图 1 研究区位置及气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of meteorological stations

1.3 研究方法

1.3.1 气候因子变化趋势分析

青藏高原区青稞一般生长季为 4—8 月, 青稞生长季平均气温、降水量和日照时数计算方法采用各气象站点每年 4—8 月逐日数据进行平均或求和, 对于其中个别缺测数据采用线性插值法或均值化等方法进行补插, 所有趋势方程采用线性回归拟合。青稞生长季 $\geq 0^\circ\text{C}$ 有效积温的计算方法同降水量和日照时数。气象要素在不同时间上的空间分布利用 GIS 空间插值技术绘制^[10-11]。

为进一步了解气温、降水量、日照时数等气候因子对青藏高原区青稞不同生长期的影响, 本研究不仅分析了近 50 年来青藏高原青稞全生育期的积温、降雨量和日照时数的时空变化, 还分析青稞关键生长期多年平均气温、降雨量和日照时数的时空变化。

1.3.2 气候生产潜力的估算

作物生产潜力是评价农业气象资源的依据之一, 其大小取决于光、温、水 3 要素的数量及其相互配合协调的程度^[12], 即气候生产潜力^[13]。青稞气候生产潜力计算时间为 4—8 月, 在综合分析并结合前人研究的基础上, 选择较为成熟、国际通用的 Thornthwaite Memorial 模型分析该地区气候生产潜力^[14-15], 具体模型与参数为:

$$T_{\text{spv}} = 30\,000 \times \left[1 - e^{-0.000\,969\,5(v-20)} \right] \quad (1)$$

$$V = \begin{cases} 1.05P / \sqrt{1 + (1.05P/L)^2} & (P \geq 0.316L) \\ P & (P < 0.316L) \end{cases} \quad (2)$$

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

式中: T_{spv} 是以实际蒸散量计算得到的作物干物质产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); V 为年平均实际蒸散量 (mm); L 为年

最大蒸散量 (mm), 表征为年平均温度的经验函数; T 为年平均气温 ($^\circ\text{C}$); P 为年降水量 (mm)。

2 结果与分析

2.1 青藏高原气候变化特征

2.1.1 近 50 年来的气候变化趋势

通过分析研究区 1965—2013 年各气象站点数据发现, 近 50 年来该区气温呈上升趋势 ($0.53^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$), 且高于中国近 50 年平均地表气温上升速率 ($0.22^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$); 该区属于高原山地气候, 降水较少, 1965 年以来的多年平均降水量为 447 mm, 但整体呈波动上升态势 ($7.8 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$), 上升速率较慢; 因该区海拔高, 空气稀薄, 水汽输入少, 晴天多, 近 50 年来年均日照时数达 2 680 h, 但整体呈波动下降趋势 ($16.9 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$) (图 2)。

2.1.2 青稞生长季的气候变化趋势

1965—2013 年间青藏高原区青稞生长季气温呈波动上升趋势 (图 3a), 从趋势线来看, 增温较明显,

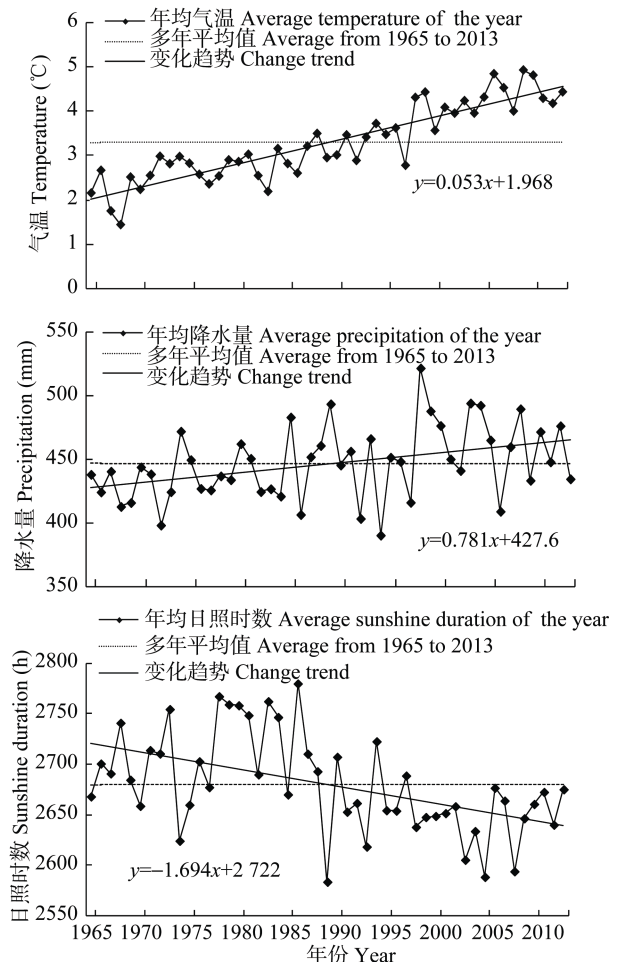


图 2 青藏高原 1965—2013 年气候变化趋势

Fig. 2 Change trends of climate in the Tibetan Plateau from 1965 to 2013

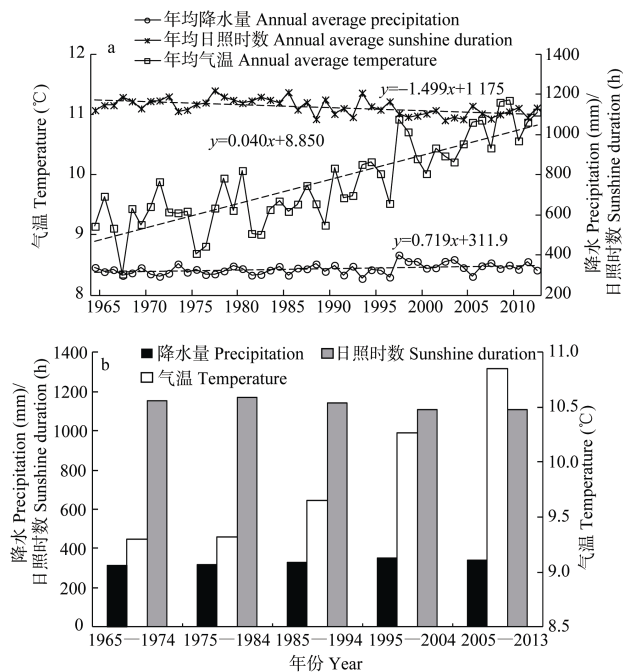


图3 青藏高原青稞生长季平均气温、平均降水量和日照时数年际(a)和年代际(b)变化趋势(1965—2013年)

Fig. 3 Interannual (a) and interdecadal (b) change trends of mean temperature, precipitation and sunshine duration during naked barley growth period in the Tibetan Plateau from 1965 to 2013

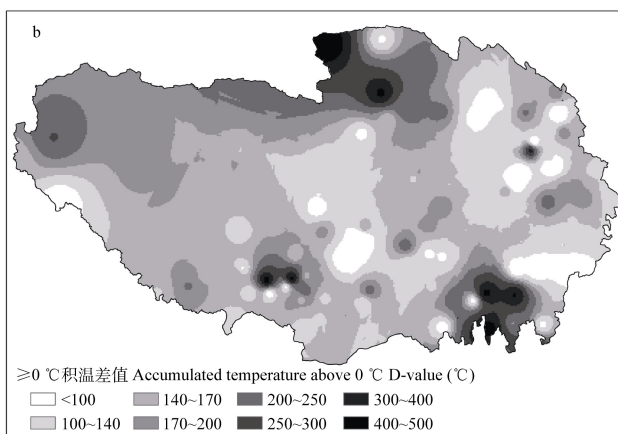
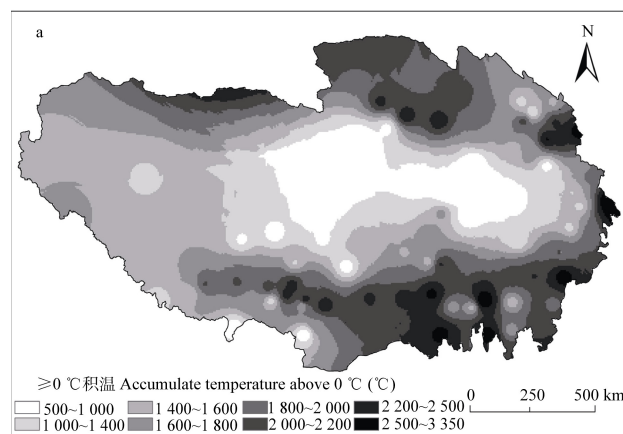


图4 青藏高原青稞生长季 ≥ 0 °C积温(2004—2013年)(a)及2004—2013年与1965—1974年积温差(b)的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of accumulated temperature above 0 °C during naked barley growth period from 2004 to 2013 (a) and its difference (D-value) between 2004 to 2013 and 1965 to 1974 (b) in the Tibetan Plateau

近 50 年来该区青稞生长季降水量呈波动变化趋势(图 3a), 整体呈小幅上升态势($7.2 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$), 多年平均降水变率为 6.17%, 说明该区多年降水较稳定, 但年内变化愈加不稳定。该区近 50 年来青稞生长季平均降水量为 330 mm, 20 世纪 60 年代到 90 年代中期降水相对平稳, 且基本低于多年平均值。20 世纪 90 年代中期以来降水呈明显增加趋势(图 3b), 说明该区青稞生长季降水呈增加趋势, 但年降水量的稳定性却有所下降。

青藏高原区的降水主要出现在夏季, 雨季与干

每 10 a 增温约 $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从增温的年际变化来看, 20 世纪 60 年代到 90 年代中期年均气温增加幅度较小, 20 世纪 90 年代后期以来增加幅度较大(图 3b)。说明该区青稞生长季气温呈加速上升态势。

积温反映着生物体对热量的要求, 青稞为喜凉作物, $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温 1 200~1 500 $^{\circ}\text{C}$ 就可以满足其正常生长发育^[16]。从青稞生长季有效积温的空间分布来看(图 4a), 有效积温从高原中部向周边呈递增趋势, 受海拔和地势等因素的影响, 积温高值区主要位于青海省柴达木北部、四川西北部和西藏东南部地区; 积温低值区主要集中于海拔 5 000 m 以上的青海省格尔木市、治多、玛沁县和西藏那曲东南部分地区, 这些区域青稞生长季有效积温不足 1 000 $^{\circ}\text{C}$, 致使这些区域不适宜青稞种植, 而青藏高原其他大部分地区均能满足其积温需求。

比较 1965—1974 年与 2004—2013 年青稞生长季有效积温发现(图 4b), 该区近 50 年青稞生长季有效积温均呈增加态势, 但由于该区地形复杂, 不同地区有效积温的变化幅度存在明显差异。近 50 年来该区有效积温值约增加 100~200 $^{\circ}\text{C}$, 其中, 青海柴达木北部、西藏东南部与四川交界地区积温增加明显。

季分明, 降水大多集中在 5—9 月^[17]。青稞生长季一般耗水量约为 450 mm 左右, 其中, 分蘖—拔节、拔节—抽穗、抽穗—蜡熟这 3 个阶段是青稞耗水旺期, 耗水量占整个生长期的 72%, 该时期的水分供应对提高作物产量有重要作用。由于受印度洋暖湿气流的影响, 高原南部降水较多, 在 500 mm 左右, 而北部由于深居内陆, 降水量较少, 在 100 mm 左右, 如西藏西部狮泉河镇和青海北部茫崖、冷湖、大柴旦等镇属典型的内陆高原荒漠或大陆性气候, 降水不足 50 mm。从降水的空间分布也可以看出(图 5a), 青

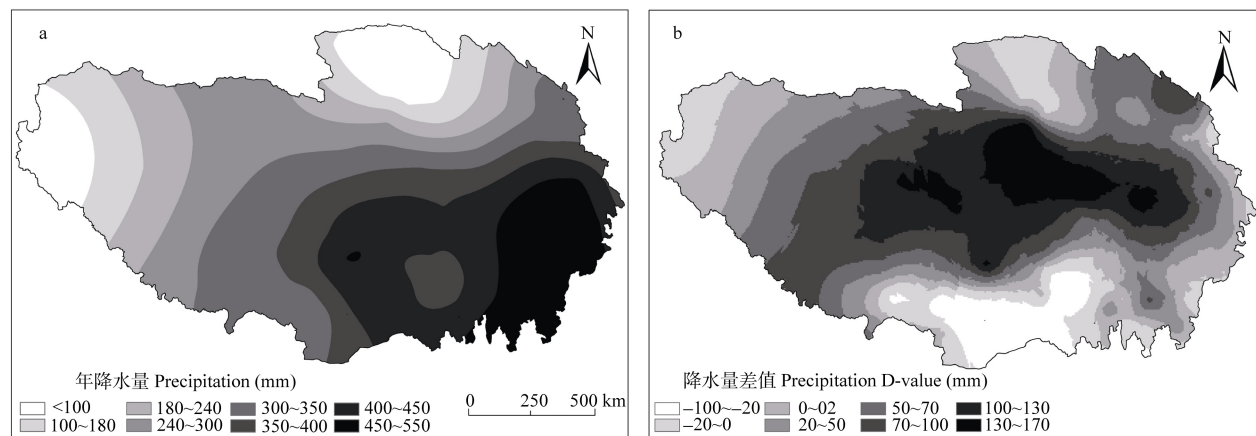


图 5 青藏高原青稞生长季降水量(2004—2013 年)(a)及 2004—2013 年与 1965—1974 年降水量差(b)的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of precipitation during naked barley growth period from 2004 to 2013 (a) and its difference (D-value) between 2004 to 2013 and 1965 to 1974 (b) in the Tibetan Plateau

藏高原区青稞生长季降水从东南部的雅鲁藏布江谷地向西北内陆递减。其中, 青藏高原西部噶尔县和青海柴达木地区降水严重不足, 不适合青稞种植^[18]; 高原中部自然降水虽不足以满足青稞生长季需水要求, 但加以人工灌溉, 可适于种植青稞; 而高原东南部地区因降水充沛可完全保证青稞生长所需量。由此可见, 降水的增加趋势有利于青稞种植。施雅风、姜永见等^[19-20]在研究青藏高原区整体气候变化趋势中也已证实整个区域以暖湿化趋势为主。

从 1965—1974 年与 2004—2013 年青稞生长季降水变化空间格局来看(图 5b), 高原中部地区降水增加显著, 而边缘部分地区有不同程度地减少, 其中, 西藏东南部地区青稞生长季降水减少高达 50~100 mm。华维、白虎志等^[21-24]在研究季风变化对青藏高原降水影响时, 得出该地区降水减少的因素较为复杂, 地势差异和高原夏季风偏强趋势明显, 可能

是造成降水向北有所偏移的主要原因, 但具体原因还有待进一步研究。

1965—2013 年青藏高原区青稞生长季多年平均日照时数在 1 138 h 左右, 但日照时数呈波动下降趋势($15 \text{ h} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)(图 3a), 1997 年后日照时数均低于多年平均值。从年际变化来看(图 3b), 从 20 世纪 60 年代到 90 年代中期日照时数均超过 1 140 h, 20 世纪 90 年代中期以来日照时数呈明显下降趋势。从青稞生长季日照时数的空间分布来看(图 6a), 日照时数由东南向西北逐渐增加, 与降水变化趋势大体一致, 低值区位于高原南部泽当镇、林芝县附近, 为 850 h 左右, 最高值位于西藏噶尔县和青海柴达木地区, 达 1 500 h 左右, 而中部地区日照时数约 1 150 h。日照时数主要影响太阳辐射总量, 而太阳辐射是导致光合生产潜力下降的主要原因。日照时数的变化与总云量、低云量、降水和水汽压等自然要素以及人为因素导致的

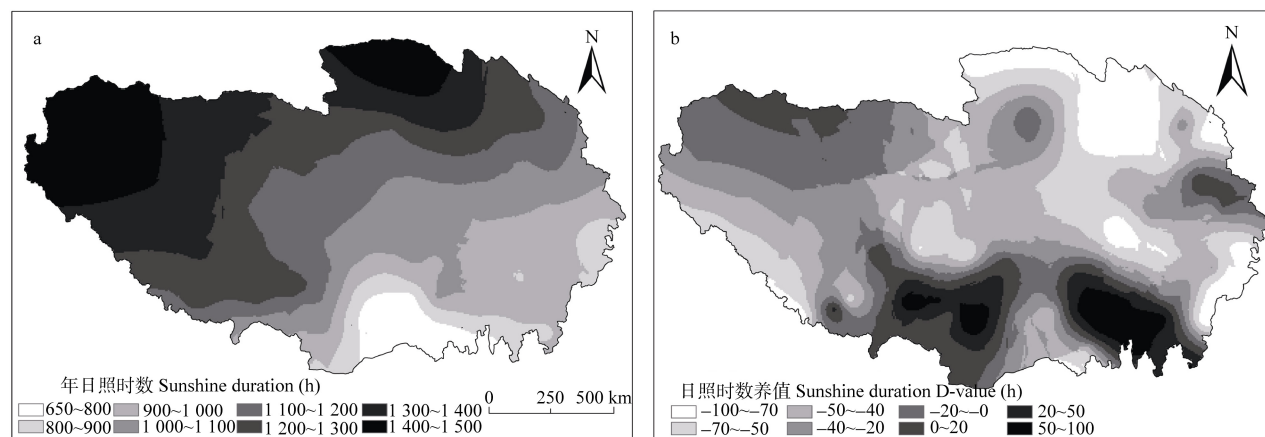


图 6 青藏高原青稞生长季日照时数空间分布(2004—2013 年)(a)及 2004—2013 年与 1965—1974 年日照时数差(b)的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of sunshine duration during naked barley growth period from 2004 to 2013 (a) and its difference (D-value) between 2004 to 2013 and 1965 to 1974 (b) in the Tibetan Plateau

气溶胶、气体状态污染物浓度增加等因素有关,从青藏高原区近 50 年来日照时数的增减量来看(图 6b),除西藏东南部地区有所增加外,大部分地区均呈不同程度的下降,其中青海省大部分地区日照时数下降明显,通过对比降水差值与日照时数增减量的空间变化发现,日照时数随降水的增加呈下降趋势。已有研究显示,青藏高原区暖季日照时数与云量、水汽压和降水量都呈极显著的负相关,但云量的变化趋势不大,平均水汽压则表现为极显著增加趋势,降水量也呈现为不显著的增加趋势,说明造成青稞生长季日照时数减少的因素主要是大气中水汽压的变化^[25-27]。

2.2 青藏高原青稞气候生产潜力

气候生产潜力,取决于光、温、水等因素的综合作用,变化较为复杂。1965—2013 年青藏高原区青稞气候生产潜力总体呈上升态势(图 7a),每 10 年约增加 $136.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增幅较小,多年平均值为 $7\,015 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从年际变化来看(图 7b),20 世纪 60 年代到 90 年代中期气候生产潜力均低于多年平均值,20 世纪 90 年代中期以来气候生产潜力增加显著,均高于 $7\,200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明 20 世纪 90 年代中期以来青稞气候生产潜力有了明显增加。

从青藏高原青稞气候生产潜力空间分布来看,呈由东南向西北递减的趋势(图 8a, b),与降水量分

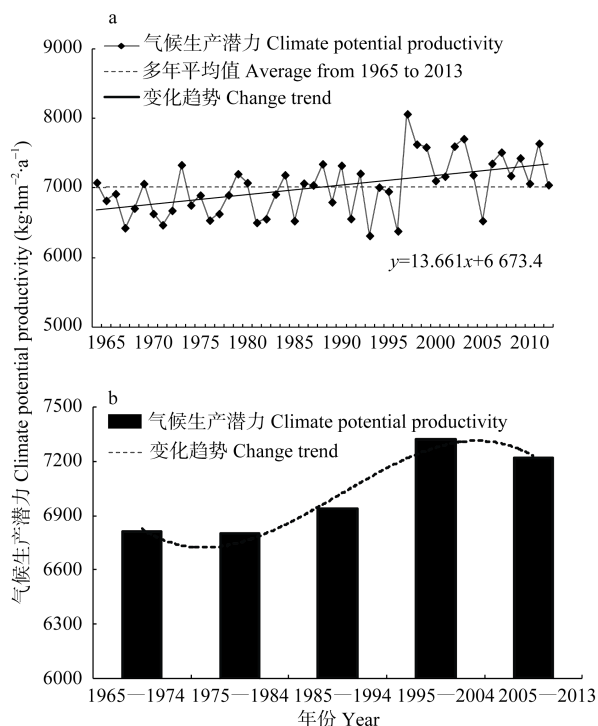


图 7 青藏高原青稞气候生产潜力年内(a)和年际(b)变化趋势(1965—2013 年)

Fig. 7 Interannual (a) and interdecadal (b) change trends of the climate potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau from 1965 to 2013

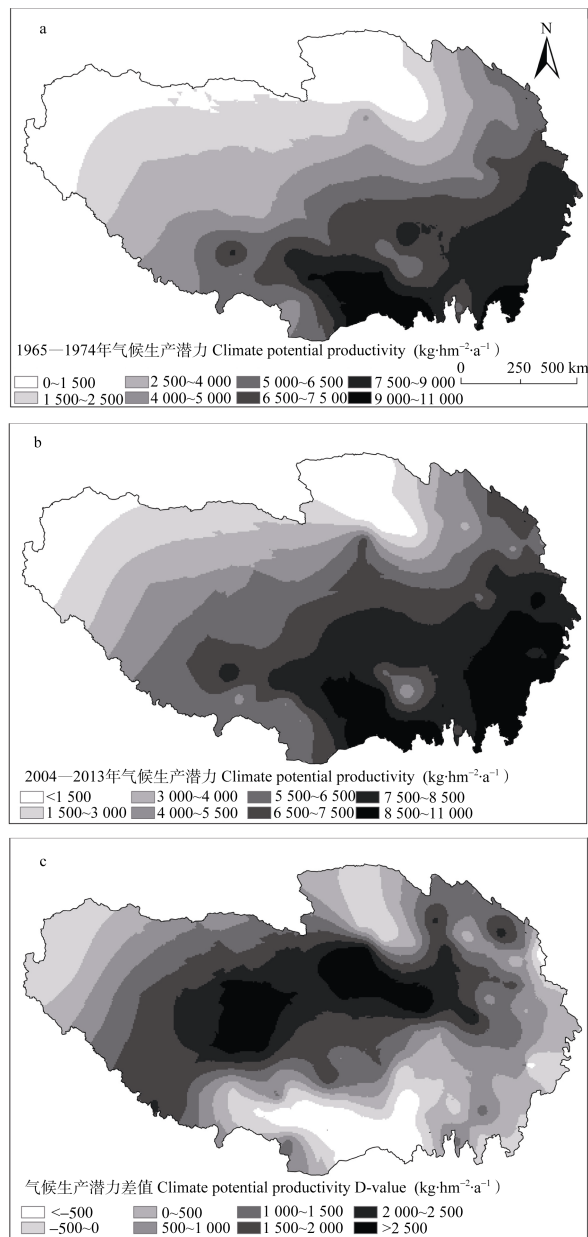


图 8 青藏高原青稞气候生产潜力(1965—1974 年, a; 2004—2013 年, b)及 2004—2013 年与 1965—1974 年青稞气候生产潜力差(c)空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of climate potential productivity of naked barley from 1965 to 1974 (a), from 2004 to 2013 (b) and its difference between 2004 to 2013 and 1965 to 1974 (c) in the Tibetan Plateau

布大体一致。比较 1965—1974 年与 2004—2013 年青稞气候生产潜力(图 8c),发现青藏高原大部分地区青稞气候生产潜力均呈增加趋势,其中,高原中部地区增加较显著。通过差值比较这两个时期增减量,作进一步验证,2004—2013 年较 1965—1974 年中部地区青稞气候生产潜力增加 $1\,500\sim2\,500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而青藏高原东南部边缘、青海柴达木北部、西藏西北部由于受气温和降水等的影响而有不同程度的下降,下降最显著的地区为西藏林芝地区,2004—2013 年

较 1965—1974 年青稞气候生产潜力下降达 500~1 000 kg·hm⁻²。

青稞生长季中最为关键的两个时期是 5 月中旬到 6 月上旬的分蘖—拔节期和 7 月初到 7 月中下旬的抽穗—开花期。在分蘖—拔节、抽穗—开花期,水分不足会使小穗原基数减少或已分化的小穗原基数退化,每穗着粒数减少,导致减产^[28],通常分蘖期土壤含水量应在 15%以上,拔节期土壤含水量应在 20%以上。青稞穗分化期如温度过高,会使穗分化过程明显缩短,导致每穗粒数减少,通常春播青稞在穗分化期日平均气温在 8~12 °C 较为适宜^[29]。

近 50 年来青藏高原青稞分蘖—拔节期、抽穗—开花期气温均呈增加趋势(图 9)。其中,分蘖—拔节期日平均气温由 1965—1994 年的 10 °C 上升到 1995 年以来的 11 °C,但仍处在青稞穗分化较适宜温度范围内;抽穗—开花期依气温变化而变化,气温高,抽穗快,反之则慢。当气温为 20~22 °C、相对湿度为 70%~73%时,开花最多,当气温在 20 °C 以下,相对湿度大于 75%时,开花较少。但开颖式开花占当时开花百分比在低温高湿的情况下为最大。青藏高原区青稞抽穗—开花期的温度从 1964—2004 年的 14 °C 上升到 2005 年以来的 16 °C,说明青藏高原青稞抽穗—开花期温度还没有达到该时期最佳发育温度,但青藏高原气温的持续升高会对青稞关键生长期产生潜在的有利影响。

近 50 年来青藏高原青稞分蘖—拔节期和抽穗—开花期降水量均呈增加趋势(图 9),但增幅较小,分蘖—拔节期降水量维持在 50 mm 左右,抽穗—开花期处于青藏高原降水较为集中的时期,降水量达 70~80 mm,但青稞在这两个关键生长期耗水量达到 100 mm 左右才可以满足其正常发育^[8]。总体来看,青藏高原区降水增加对青稞的生长发育起到促进作用,但还需根据当地的实际情况,做好灌水工作,才能保证青稞高产。

近 50 年来青稞分蘖—拔节期日照时数呈微弱的减少趋势,但抽穗—开花期日照时数变化明显,2004—2013 年较 1965—1974 年减少 15 h 左右(图 9)。因该时期为青藏高原暖季,温度逐步升高,且处于雨季,降水较丰富,导致水汽压增加而引起日照时数下降显著。青稞高原原因海拔较高、空气相对稀薄,年日照时数充足、辐射强度大,日照时数的减少使得该地区蒸散量减弱,水分得到保持,从而进一步促进青稞生长发育。

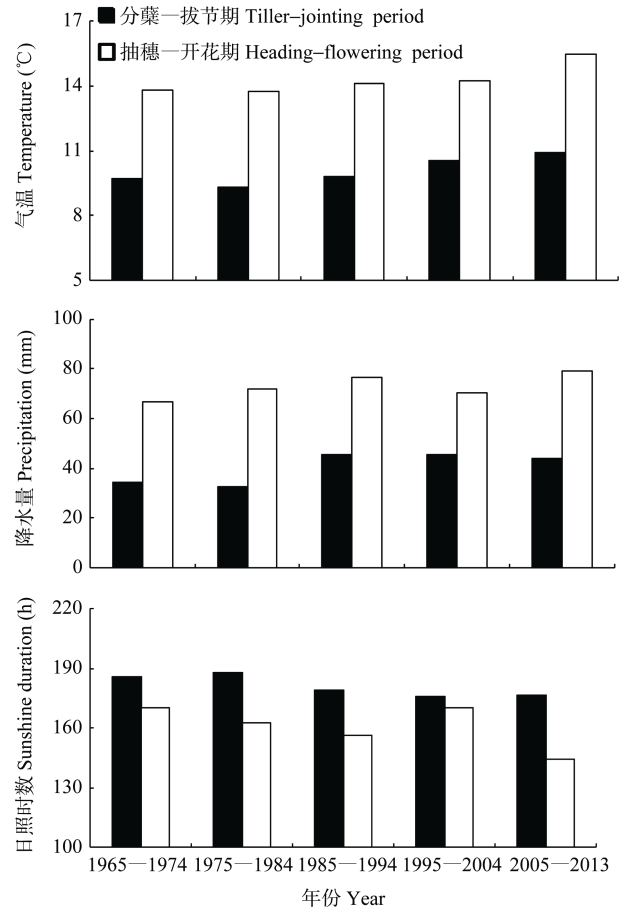


图 9 青藏高原青稞关键生长期气温、降水和日照时数的年际变化(1965—2013 年)

Fig. 9 Interdecadal change trends of temperature, precipitation and sunshine duration at naked barley crucial growth stages in the Tibetan Plateau from 1965 to 2013

2.3 气候因子与青稞生产潜力的关系

为了进一步阐明气候因子对青稞气候生产潜力的影响,对青稞生长季和关键生长期 ≥ 0 °C 积温、降水、日照时数与青稞气候生产潜力进行相关分析(表 1),结果表明:

1) 青稞生长季降水是影响青稞气候生产潜力最为关键的因子,与气候生产潜力的相关系数达 0.992; ≥ 0 °C 积温次之,与气候生产潜力的相关系数为 0.559,二者均在 0.01 水平上显著。陈长青等^[12]在分析气候变暖对东北地区春玉米生产潜力的影响时,也得出了降水是影响作物生产潜力的关键因子。但是,日照时数与青稞气候生产潜力呈显著负相关,相关系数为 -0.787,在 0.01 水平上显著。通过进一步分析发现,青稞生长季日照时数与降水、积温的相关系数为 -0.765、-0.528,二者均在 0.01 水平上显著负相关,说明青稞生长季降水量和积温的不断增加使空气中水汽压增大是导致日照时数下降的主要原因,日照时数的下降严重影响到青稞光合作

表 1 不同气候因子与青稞生产潜力的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of different meteorological factors with climate potential productivity of naked barley

生长季 Growth period			关键生长期 Key growth stage					
			分蘖—拔节期 Tiller-jointing			抽穗—开花期 Heading-flowering		
$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	年均降水量 Annual average precipitation	年均日照时数 Annual average sunshine duration	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration
0.559**	0.992**	-0.787**	0.425*	0.594**	-0.380	0.322*	0.602**	-0.408**

和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关。 and * show significant correlation at 0.01 and 0.05 levels (double-side), respectively.

用能量来源,净光合速率,显著降低了青稞干物质累积量^[28]。可见,降水和气温是影响青稞气候生产潜力的关键因子,也是导致日照时数与青稞气候生产潜力呈负相关的关键。

2)青稞分蘖—拔节期降水量与气候生产潜力的相关系数为 0.594, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与气候生产潜力的相关系数为 0.425, 分别在 0.01、0.05 水平上显著,而日照时数与青稞气候生产潜力呈不显著的负相关,说明在青稞分蘖—拔节期降水仍然是影响青稞气候生产潜力最为关键的因子, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温次之。

3)青稞抽穗—开花期降水量与气候生产潜力的相关系数为 0.602, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与气候生产潜力的相关系数为 0.322, 分别在 0.01、0.05 水平上显著,而日照时数与青稞气候生产潜力呈负相关,相关系数为-0.408, 在 0.01 水平上显著。说明在青稞抽穗—开花期降水依然是影响青稞气候生产潜力最为关键的因子, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温次之。

3 结论与建议

通过分析青藏高原区近 50 年来的气候变化趋势、青稞生长季、关键生长期气候变化趋势及气候要素与青稞气候生产潜力的关系,得出以下结论:

1)近 50 年来青藏高原区气温和降水均呈现上升趋势,但气温上升较显著,降水增加较缓,日照时数减少趋势明显,尤其在 20 世纪 90 年代以来,青藏高原气候变化向着暖湿化趋势发展。

2)近 50 年来青藏高原区青稞生长季气温、降水均呈上升趋势($0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $7.2\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$),且增温速率高于全球平均增温速率,20 世纪 90 年代以来气温增加尤为显著。其中,青稞生长季 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温由高原中部向周边呈递增趋势,高原北部地区增幅较大,而降水显著增加地区主要在高原中部;青稞生长季日照时数呈下降趋势($15\text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$),20 世纪 90 年代中后期以来下降尤为显著,除高原南部部分地区日照时数有所增加外其他大部分地区均呈下降趋势,且高原东北部日照时数下降较为明显。

3)近 50 年来青藏高原青稞气候生产潜力总体呈上升趋势($136.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$),但增幅较小。20 世纪 90 年代中期以来气候生产潜力增加趋势显著。其中,青藏高原区东南部边缘、青海柴达木北部、西藏西北部有不同程度的下降趋势,西藏林芝地区下降最为明显,达 $500\sim 1\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

4)降水是影响青稞气候生产潜力最为关键因子,温度次之。

由于研究区西北部气象站点较少,为使空间插值尽可能反映实际情况,利用新疆南疆地区几个站点资料进行补充,但插值结果还不具有较强的代表性。另外在分析气候的年代际变化过程中没有考虑气候突变点的影响,在未来研究中还需做进一步探讨。

基于上述研究结论,提出以下建议以提高该区青稞产量:对气温适宜、降水量和气候生产潜力原本较高而近年下降的地区,如西藏南部泽当、尼木等地区,应提高水资源有效利用率,加强灌溉的时效性,在青稞关键生长期及时引水灌溉以保证青稞水分需求;对气温适宜、降水量和气候生产潜力原本较低而近年上升的地区,应采取降水旺季蓄水,以备干旱季节利用措施,或采用地膜种植技术、引进耐旱的青稞新品种;对气温较低、降水和气候生产潜力与过去相比都有所增加的地区,应采取耕地保护措施,提高土壤本身的蓄热、蓄水能力,同时提高光能利用率;对整个地区来说,除了提高光能、水资源利用率,涵养水源外,还应增加外部投入,如使用植物保护技术等保护性投入,用于控制病、虫、草等有害生物的发展,提高农业生物种群和群落的净生产力;适量增加有机化肥使用,提高作物产量;加大农业机械和工程(道路、厂房、水利设施等)设施性投入,为农业生物创造良好的物理环境,特别是土壤环境,以及提高劳动生产率,节约资源和农时等。最重要的是保护高寒生态脆弱区的生态环境,尤其是对草场和高山植被的保护。与此同时农户应加强由极端气候事件如寒潮、低温、强降雨等引发

的气象灾害预测和防御能力, 采用科学的方法和更规范的管理制度来提高青稞产量。

参考文献

- [1] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估(I): 中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9
Qin D H, Ding Y H, Su J L, et al. Assessment of climate and environment changes in China (I): Climate and environment changes in China and their projection[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1): 4-9
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [3] 张正斌, 段子渊, 陈兆波, 等. 中国应抓住气候变化的战略机遇期[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 253-261
Zhang Z B, Duan Z Y, Chen Z B, et al. China should seize strategic opportunity in climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 253-261
- [4] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30 年来我国农业气象灾害变化趋势和分布特征[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73
Fang S B, Yang J J, Zhou G S. Change trend and distributive characteristics of agrometeorological disasters in China in recent 30 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 69-73
- [5] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 增温对华北冬小麦生产影响的试验研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 902-908
Tan K Y, Fang S B, Ren S X. Experiment study of winter wheat growth and yield response to climate warming[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 902-908
- [6] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 农业应对气候变化蓝皮书: 气候变化对中国农业影响评估报告(No. 1)[M]. 北京: 社会科学出版社, 2014
Jiao M Y, Zhou G S, Chen Z L. Agricultural Blue Book on Climate Change: Report Assessment of the Impact of Climate Change on China Agriculture (No. 1)[M]. Beijing: Social Science Press, 2014
- [7] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12
Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3-12
- [8] 尹志芳, 欧阳华, 张宪州. 西藏地区春青稞耗水特征及适宜灌溉制度探讨[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1666-1675
Yin Z F, Ouyang H, Zhang X Z. Study on water consumption of spring naked barley land and suitable irrigation system in Tibet[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1666-1675
- [9] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究, 2011, 30(12): 2289-2295
Yu B H, Lü C H. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2011, 30(12): 2289-2295
- [10] 李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 565-573
Li X, Cheng G D, Lu L. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6): 565-573
- [11] 刘登伟, 封志明, 杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 75-79
Liu D W, Feng Z M, Yang Y Z. Selection of the spatial interpolation methods for precipitation in the Haihe River Basin[J]. Geo-Information Science, 2006, 8(4): 75-79
- [12] 陈长青, 类成霞, 王春春, 等. 气候变暖下东北地区春玉米生产潜力变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1272-1279
Chen C Q, Lei C X, Wang C C, et al. Changes of spring maize potential productivity under the background of global warming in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1272-1279
- [13] 程鸿, 何希吾. 中国自然资源手册[M]. 北京: 科学出版社, 1990
Cheng H, He X W. Chinese Natural Resources Handbook[M]. Beijing: Science Press, 1990
- [14] 潘虹, 邱新法, 廖留峰, 等. 近 50 年贵州省气候生产潜力时空变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 158-163
Pan H, Qiu X F, Liao L F, et al. Spatiotemporal variation of climatic potential productivity in Guizhou Province in the last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(11): 158-163
- [15] 罗永忠, 成自勇, 郭小琴. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 221-229
Luo Y Z, Cheng Z Y, Guo X Q. The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 221-229
- [16] 陈玉华. 青稞生产在甘南州的技术应用及措施[J]. 甘肃农业, 2013(7): 6
Chen Y H. The technology application and measures of highland barley production in the state of Gannan[J]. Gansu Agriculture, 2013(7): 6
- [17] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 157-170
Wei Z G, Huang R H, Dong W J. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 157-170
- [18] 汪青春, 秦宁生, 张占峰, 等. 青海高原近 40a 降水变化特征及其对生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 153-158
Wang Q C, Qin N S, Zhang Z F, et al. Precipitation change and its impact on eco-environment of Qinghai Plateau for the last 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 153-158
- [19] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 17-44
Shi Y F. The Evaluation of China Northwest Climate Shift from Warm Dry to Warm Wet[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003: 17-44

- [20] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近 40 年来气候变化特征及湖泊环境响应[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1503–1512
Jiang Y J, Li S J, Shen D F, et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971–2008[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1503–1512
- [21] 白虎志, 谢金南, 李栋梁. 近 40 年青藏高原季风变化的主要特征[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 22–27
Bai H Z, Xie J N, Li D L. The principal feature of Qinghai-Xizang Plateau monsoon variation in 40 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(1): 22–27
- [22] 华维, 范广洲, 王炳赞. 近几十年青藏高原夏季风变化趋势及其对中国东部降水的影响[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 784–794
Hua W, Fan G Z, Wang B Z. Variation of Tibetan Plateau summer monsoon and its effect on precipitation in East China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(4): 784–794
- [23] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原—季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257–267
Xu X D, Tao S Y, Wang J Z, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-monsoon “large triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(3): 257–267
- [24] 李川, 张廷军, 陈静. 近 40 年青藏高原地区的气候变化——NCEP 和 ECMWF 地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J]. 高原气象, 2004, 23(增刊): 97–103
Li C, Zhang T J, Chen J. Climatic change of Qinghai-Xizang Plateau region in recent 40-year reanalysis and surface observation data — Contrast of observational data and NCEP, ECMWF surface air temperature and precipitation[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(Sup.): 97–103
- [25] 杜军, 边多, 胡军, 等. 西藏近 35 年日照时数的变化特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 492–500
Du J, Bian D, Hu J, et al. Climatic change of sunshine duration and its influencing factors over Tibet during the last 35 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 492–500
- [26] 华维, 范广洲, 陈权亮, 等. 青藏高原年日照时数的年代际变化趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(12): 1149–1155
Hua W, Fan G Z, Chen Q L, et al. Study of interdecadal variation of the annual sunshine duration over Tibetan Plateau[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(12): 1149–1155
- [27] 华维, 范广洲, 周定文, 等. 青藏高原四季日照时数年际、年代际变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1810–1817
Hua W, Fan G Z, Zhou D W, et al. Analysis on the variation trend of interannual and interdecadal seasonal sunshine duration over Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1810–1817
- [28] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 3–12
Hu S, Mo X G, Lin Z H. The contribution of climate change to the crop phenology and yield in Haihe River Basin[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(1): 3–12
- [29] 阿布都克日木·阿巴司, 胡素琴, 努尔帕提曼·买买提热依木. 新疆喀什气候变化对棉花发育期及产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 919–930
Abasi A, Hu S Q, Maimaitireyimu N. Effect of climate change on cotton growth period and yield in Kashgar City, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 919–930