

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.02.024

孟凡栋,汪诗平,白玲. 青藏高原气候变化与高寒草地[J]. 广西植物, 2014, 34(2): 269—275

Meng FD, Wang SP, Bai L. The climate change and alpine grassland on the Tibetan Plateau[J]. *Guihaia*, 2014, 34(2): 269—275

青藏高原气候变化与高寒草地

孟凡栋^{1,3}, 汪诗平^{1,2*}, 白玲²

(1. 中国科学院 青藏高原研究所 高寒生态学和生物多样性实验室, 北京 100101; 2. 西藏大学—中国科学院青藏高原研究所 那曲生态环境综合观测研究站, 西藏 那曲 852000; 3. 中国科学大学研究生院, 北京 100039)

摘要: 综述了近五十年来青藏高原气候和高寒草地的变化趋势, 阐述了气候变化对高寒草地的可能影响。气候变化主要通过水、热过程及其诱导的环境变化对青藏高原高寒草地产生显著的影响。主要过程包括: 气候变化对气候带、植被带、植物、植物群落、农业生产以及生态系统固碳潜力等的影响。从目前的观测和研究结果来看, 有关青藏高原气候变化及其对高寒草地的可能影响都还很难得出一致的结论。因此, 如何科学评价气候变化及其预测和评价对高寒草地结构和功能的潜在影响, 以及如何将已经发生的变化纳入到全球变化模型或评价体系中, 以便更加精确地评估气候变化的长期影响, 将成为必须要回答的关键科学问题。

关键词: 青藏高原; 气候变化; 高寒草地; 植被分布; 物候; 生产力; 土壤碳库

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)02-0269-07

The climate change and alpine grassland on the Tibetan Plateau

MENG Fan-Dong^{1,3}, WANG Shi-Ping^{1,2*}, BAI Ling²(1. *Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity, Institute of Tibetan Plateau Research of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;* 2. *Naqu Ecological and Environmental Observation Research Station, University of Tibet-Institute of Tibetan Plateau Research of Chinese Academy of Sciences, Naqu 852000, China;* 3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The paper systematically summarized the tendency of climate change and its potential effects on alpine grassland of Tibetan Plateau nearly past 50 years. The data showed that the magnitude of temperature increase on the Tibetan plateau was significantly greater than the average level of China even the world. Although the annual total precipitation tended to increase, the spatial and temporal variations were high from Southern to Northern and from Western to Eastern of the plateau. The climate changes significantly affected the alpine grassland of the Tibetan Plateau. The results from observations and simulations indicated that: (1) The climate zones and vegetation zones of Tibet Plateau could move to northward and westward, whereas the variation tendency of different vegetation areas depended on the different scenarios simulated by different models; (2) Rising temperatures advanced green-up and delayed yellow period from observations which prolonged growing seasons, but remote sensing data showed opposite results since the end of 1990s; (3) Species richness decreased and species composition changed; (4) the vegetation coverage and NPP enhanced from simulated scenarios, but opposite results were found from OTC experiments in the region; (5) Although prolong growing season may improve plant production, the risk of natural disasters could also increase for forages and crops; (6) The future climate change may has a little effect on soil carbon source/sink through

收稿日期: 2013-06-30 修回日期: 2013-07-13

基金项目: 西藏科学与技术厅项目; 中国科学院青藏专项(XDB03030403); 中国科学院碳专项(XDA05070205)。

作者简介: 孟凡栋(1987-), 男, 山东人, 草原生态学硕士, 主要研究方向为气候变化生态学, (E-mail) xiumuzaichangge@163.com。

*通讯作者: 汪诗平, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为草原生态学和草地畜牧业, (E-mail) wangsp@itpcas.ac.cn。

simulated different scenarios. Based on the review, we found that generally there were inconsistent results about the climate change and its potential effects on alpine grassland so far on the Tibetan plateau. Therefore, it is necessary for us to research how observed temperature increase to affect structures and functions of the alpine system, and how to bring the generated changes into global change models or evaluation systems, in order to accurately evaluate the long-term effects of climate change in the region.

Key words: Tibetan Plateau; climate change; alpine grassland; vegetation distribution; phenology; plant production; soil carbon

2009 年 12 月联合国哥本哈根气候大会把全球气候变暖的话题推向了高潮。代表 IPCC 有关机构认为过去五十年全球变暖是人类活动导致的结果,而与 IPCC 观点不同的 NIPCC 认为是自然因素主导了气候变化,其中太阳活动的影响不可忽视。因此,从目前的观测数据及模拟研究的结果看,全球变暖似乎都是一个不争的事实,其争议的核心主要在于气候变暖的程度、产生的原因以及对气候变暖影响的评估等问题。为了较全面地深入了解近五十年来青藏高原气候变化趋势及其对高寒草地的可能影响,本文系统综述了国内外有关观测和模拟研究结果,并试图提出存在的关键科学问题,旨在为该区域进一步开展全球变化生物学研究、降低气候变化的不利影响提供基础研究进展。

1 近年来青藏高原气候变化趋势

1.1 温度

近五十年来,青藏高原年均地表气温每 10 a 上升 $0.2\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,增幅高于全国的 $5\sim 10$ 倍。高原冬、春季气温和地表温度均明显升高,而秋、夏季增温则较弱(张法伟等,2009;Liu *et al.*,2000)。Johns *et al.*(1997)的研究结果表明,青藏高原到 2100 年气温将上升 $2.0\sim 3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大的温度上升值为 $3.0\sim 3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大升温将出现在冬季。高原气温在变暖过程中也存在较大波动,高原平均气温年际变化呈先冷后暖的过程,1987 年是转折点(周宁芳等,2005)。气温变化趋势与高度呈正比,高度越高变暖越明显(周刊社等,2010)。

青藏高原气温变化存在较大地域性差异,尤以西藏、青海交界地带增温更显著,高原北部冬、夏两季和年均气温变化幅度都比南部大,同时西部又比东部大(向波等,2001)。气温升高的开始时间也不同步,一般由高原西部逐步向东部地区推进,说明西部生态环境脆弱区域对温度的变化更敏感。但 Frauenfeld *et al.*(2005)的分析发现,青藏高原气温

并无明显增加,地面气象站的观测资料可能受到土地利用变化和工业化进程的影响。

1.2 降水

青藏高原降水量在 1961—2001 年间,总体略有增加,但降水量的增加主要集中在冬、春季节,年际变化波动较大(张磊等,2007)。从 20 世纪 60 年代初到 80 年代中后期,青藏高原为相对暖干时期,从 80 年代后期开始,高原进入相对暖湿时期(牛涛等,2005)。与气温的空间分布格局相似,青藏高原也分为南北两区(南区主要是西藏,北区主要是青海),南区的年降水量在 40 a 里经历了先减少后增加的过程,北区则呈现先增加后减少的趋势(张磊等,2007)。根据 Hadley 中心的 Johns *et al.*(1997)利用 GCM 气候输出结果表明,青藏高原到 2100 年,降水模式将会逐渐发生改变,从北部的增加到西南的减少,降水在高原中部和东部将增加 $0\sim 300\text{ mm}$,而在西南部将减少 $0\sim 500\text{ mm}$ 。

不同区域的变化不同,黄河源区变化趋势为暖干化,长江源区和澜沧江源区的变化趋势为暖湿化(李林等,2006)。羌塘高原年均降水量增加 63 mm,多年平均降水量分布格局表现为东部>中部>西部(王景升等,2010);怒江流域年均降水量波动较大,为增加趋势,增幅为 $13.8\text{ mm}/10\text{a}$,全流域多数地区表现为“暖湿型”变化趋势(周刊社等,2010)。

1.3 日照时数、云量和积温

近四十年来,“三江源”区日照时数具有显著的阶段性波动上升趋势,60~80 年代中后期是主要的上升时期,90 年代中期有所放慢,年日照时数的气候倾向率为 $19.76\text{ h}/10\text{a}$,且各季日照时数都有增加趋势,夏季增加最多,气候倾向率为 $9.95\text{ h}/10\text{a}$ (张占峰等,2001)。对比气温、最低和最高平均气温的变化,发现江河源区气温增暖、日照时数增加;日照时数增加和最低最高气温增加一致(杨建平等,2004)。

1971—2004 年青藏高原总云量自东南向西北方向递减,且年际和各季的总云量均有下降趋势,总

云量与日照时间、日较差有较好的负相关,但与相对湿度有很好的正相关,而与降水量相关性不大(张雪芹等,2007)。另外,认为总云量减少与高原大气气溶胶特别是吸收性气溶胶(如黑炭)增加以及臭氧的损耗有关(张雪芹等,2007)。“三江源”区光能和热量资源总体上是呈增加的趋势,而且热量的增加在全年各季均有反映; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的气候倾向率 $235.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (张占峰等,2001)。

1.4 蒸散和径流量

张占峰等(2001)发现 1961—1999 年和各季的蒸发量均呈减少趋势,其中年蒸发量的气候倾向率为 $-12.84\text{ mm}/10\text{a}$,但进入 90 年代之后又有所回升,呈现暖干化趋势。降水量作为蒸发量的主要物质来源,其变化趋势在很大程度上决定了蒸发量的变化(李林等,2006)。全球气温变暖和地表温度变暖是蒸散量增加的主要原因。

陈利群等(2007)采用 2 个分布式水文模型(SWAT 和 VIC)分析了 1960—2000 年黄河源区气候变化和土地覆被对径流的影响,发现气候变化是径流减少的主要原因,90 年代以前,土地覆被变化对径流影响很小,气候变化对径流的影响在 95% 以上;70~90 年代,气候变化的水文效应为 65%~80%,土地利用变化的影响为 6%~16%,生态退化、冻土融化等的水文效应为 14%~20%。

2 气候带和植被带变迁

由于气候趋暖,高原寒带的东界向西移动,亚寒带的东界和东南界显著向西和西北方向迁移,而高原温带则相应地扩大,主要体现在高原东部和青海北部,寒性草原带向温性草原带转化(赵昕奕等,2002)。1986—2000 年间“三江源”高寒草甸分布面积总体上约减少了 8%,而沼泽草甸生态分布面积锐减 28% 左右,而高寒草原生态系统其分布面积呈现增加趋势,尤其是覆盖度小于 30% 的低覆盖草原面积约扩展了 10%。因此,与冻土环境关系密切的高寒草甸和高寒沼泽草甸出现了显著的退化,而与冻土环境关系不密切的高寒草原生态系统则相对稳定并出现扩张趋势(王根绪等,2006)。

张新时等(1994)利用模型研究表明,在年均温增加 4°C 与年降水量增加 10% 的情况下,高原东南部的山地植被有明显的森林化趋势;高山草甸的面积显著减少,大部分转为山地寒温带针叶林;高山草原

的面积减少过半,多转为温性草原,而高原西部的高寒荒漠大部转为温性荒漠。Ni(2000)在假设降水不变的情况下,应用改进的 Bioma 3 平衡陆地生物模式进行模拟,对现实高原生物群区分布及在大气 CO_2 浓度增加到 500 mg/L 时的气候情景下高原生物群区的分布进行了模拟,认为气候变化可能导致温带荒漠、高山草原和极地荒漠的减少,而寒温带针叶林、温带灌丛草甸和温带草原将大幅度增加。

3 气候变化对植物和植物群落的影响

3.1 物候

周华坤等(2000)的研究发现增温使得平均返青期提前,平均枯黄期推迟,植物种群的平均生长期延长 4.95 d 。虽不及气温影响明显,但各地年降水量和阶段降水变化对植物生长关键期产生了重要影响,东部农业区、环青海湖区和三江源区返青期提前而黄枯期普遍呈推迟趋势,主要是由于上年度夏秋季降水量增加,封冻后所蒸发减少,使土壤能保持较好的底墒,气温升高后有利于土壤解冻后植物的返青;柴达木盆地近年来降水量虽略有增加,但不能弥补因气温升高而造成的蒸发加剧,使返青期推迟(李红梅等,2010)。

3.2 群落组成和植物丰富度

Klein *et al* (2004)研究发现增温降低了高寒草甸物种丰富度,禾草的比例下降,而阔叶草的比例上升,特别是灌丛入侵,但李英年等(2004)研究发现相反的结果。杨元合等(2004)研究表明,物种丰富度随经度和纬度增加呈增加趋势;随海拔上升呈减少趋势,物种丰富度与生长季降水和温暖指数呈显著正相关,且前者的影响大于后者(王谋等,2004)。青藏高原的高寒草甸、青海的沼泽化草甸由于气候暖干化而面临生存危机,危险性最高(袁婧薇等,2007)。20 世纪 70 年代,海北生态站西永安城南滩的一片沼泽化草甸,以藏嵩草为建群种(夏武平等,1991),而近年来由于气候变化导致该区地下水位下降、土壤湿度降低,中生禾草类占主导地位,群落结构发生改变(李英年等,1998)。由此可见,气候变化已影响到高原植被物种组成和群落结构,从而进一步影响植被群落的演替(李英年等,2004)。

3.3 植被覆盖度变化

随着全球气候变暖,高原植被覆盖状况呈现两极变化:高原中部和西北部生态环境恶化,植被覆盖

呈退化趋势(王一博等,2004);东南部湿润地区植被生长空间拓展,地表植被呈增加的发展趋势(徐兴奎等,2008)。周睿等(2007)认为是降水变化驱动了该地区的 NDVI 变化。另有学者认为气温的影响大于降水。杨元合等(2006)认为高寒草原的 NDVI 总体上显著增加特别是春、夏季,主要由于春、夏季气温上升使生长季提前和生长加速造成的,与降水相关性不显著;但高寒草甸夏季 NDVI 与春季降水呈显著正相关,这说明温度是高寒草地植被生长的限制因子,温度上升能促进草地植被生长。高寒草地(高寒草甸、高寒草原)夏季 NDVI 的增加是夏季温度和春季降水共同作用的结果;高寒草地植被夏季 NDVI 与春季降水显著正相关,表明两者间存在滞后效应(杨元合等,2006)。不同草地类型对降水和气温响应的滞后期不同,对气候因子的响应滞后期是高寒草甸和高寒草原较短,而高寒荒漠和高寒荒漠草原则较长;植被对气候变化响应的滞后期与植物瞬时发生的生理调整时间无关,而与生物地球化学循环的调节时间尺度一致(赵玉萍等,2009)。

3.4 生产力变化

在中国陆地植被范围内,青藏高原的 NPP 相对增加量最大且在波动中呈上升趋势,但区域差异性很大,如青海省的东南部、西宁地区和西南部的部分地区,以及西藏东部的横断山区和雅鲁藏布江南部的部分地区的 NPP 增加显著(朴世龙等,2002)。不同植被类型 NPP 增加幅度不同,荒漠的相对增加量最大,草甸和草原次之,然后是森林和灌丛(孙睿等,2001)。但 Klein *et al.* (2004) 的研究表明,增温降低了地上初级生产力。

Ni(2000)利用 BIOME3 模型模拟在未来气候和 CO₂ 浓度变化后青藏高原不同植被类型分布及生产力变化情况,结果显示 11 种植被的 NPP 都显著增加。罗天祥等(1998)发现随着温度增加,生物生产量呈 S 型曲面递增,且其递增速率随降水量增加而加快(罗天祥等,1998)。未来 10 a 气温增加 0.44 °C,降水量增加 8 mm/10a,地上生物量将明显减少(王根绪等,2007)。由此可知,降水的小幅度增加,并不能改善增温对生物量产生的正面影响。吕新苗等(2006)发现气候变化将导致高寒草甸初级生产力显著下降,其中沱沱河沿 NPP 减少了约 30%;若同时考虑 CO₂ 浓度倍增的影响,由于 CO₂ 的补偿作用,初级生产力将明显增加。说明 CO₂ 浓度变化对高寒草甸初级生产力影响较显著。

在 20 a 时间尺度上,地上净初级生产力对降水变化不敏感,与气温关系较为密切(李英年等,2004);但周立等(1995)的研究结果正好相反,通过对 1980~1991 年的数据研究发现,降水是该地区地上净初级生产力振荡的激励源,而气温只是一个辅助源。张法伟等(2009)发现地上净初级生产力与年均气温同方向波动 20 a,与年降水仅 14 a,两者结果差异主要是数据集的大小/年际地上净初级生产力对气温可能存在于一个 5~9 a 的滞后响应,其相关程度较低;据小波分析结果,地上净初级生产力的年际变化与气温波动趋势较一致,滞后相关分析表明其与生长季气温相关程度较大,其变化幅度则与降水相似,但趋势方向相反。海北高寒草甸地区的气温、降水和地上净初级生产力在较长时间尺度上均存在 13 a 的周期,与太阳活动黑子周期(11 a)较为一致,短时间尺度的振荡则可能表现为自身振荡(张法伟等,2009),而周立等(1995)发现地上净初级生产力的周期为 3~4 a。

4 气候变化对青藏高原农业生产的潜在影响

未来气候变暖虽在一定程度上减少和缓解低温对高寒草甸牧草生长的不利影响,但同时降水须随之增加,才能提高牧草产量(李英年等,2000)。由于暖干化以及气候的不稳定性与气象灾害可能增多而导致负面效应(赵昕奕等,2002)。就农作物生长的自然资源而言,增温使高寒区农作物播种期提前,无霜期延长,农作物产量提高;在海拔相对较低的河谷农区越冬作物早熟,可进行作物复种;光合作用增强,植物生长旺盛,很多原来不具备种植条件的区域可进行农业开垦。气候变化带来的降水时空分布不均,导致青藏高原一些地区干旱加剧,干旱使植被发育不充分乃至退化,由此带来生物总量减少、草场载畜能力降低;同时极端天气事件增多,雪灾等极端气候事件造成牲畜因冻、饿而批量死亡现象加剧,农业灾害和病虫害增多。

5 气候变化对生态系统固碳潜力的影响

不同植被类型整个土壤剖面土壤有机质含量为

森林>灌丛>草甸>草原>荒漠(田玉强等,2007)。这表明土壤有机质含量取决于植被生产力和有机质的矿化强度,因为它们均强烈的受到水热状况等影响,而样带水热状况自北向南逐渐改善,有利于植物生长,促进土壤有机质含量增加。张永强等(2006)的研究表明,1960—2002年间青藏高原主要草地生态系统土壤有机碳含量均呈现先上升后迅速下降的年际动态特征,且不同站点土壤有机碳含量变化趋势有一定差别,这种年际变化显示本区域对全球气候变化的敏感性。Tan *et al.*(2010)的研究表明,在未来增温 2℃ 的条件下,尽管 NPP 增加了 9%,但现在的土壤有机碳库将损失约 10%。Yang *et al.*(2009)的研究表明,1980—2004年间青藏高原土壤碳库虽表现出较大的年际变化,但总体上保持相对稳定,可能是因为增温增加了初级生产力从而补偿了增温增加的土壤呼吸作用。

凋落物碳库是联系植物碳库和土壤碳库的中间环节。气候变暖对凋落物分解的影响,一方面体现在影响凋落物的产生量和质量,另一方面加快了凋落物的分解速率(Luo *et al.*,2010)。降雨对土壤呼吸会产生一定影响,当降雨量适中时,高寒草甸土壤呼吸先略降低而后迅速增加,说明降雨刺激土壤呼吸率增大(Shi *et al.*,2006)。当降雨量过大时,降雨对土壤呼吸基本无影响(Zhao *et al.*,2006)。气候变化打破了原有的碳源、碳汇平衡,高寒草甸由弱的碳汇转变为弱的碳源;若同时考虑 CO₂ 浓度倍增的影响,由于 CO₂ 的补偿作用,初级生产力和土壤有机碳、氮明显增加,说明 CO₂ 浓度变化对高寒草甸初级生产力和土壤有机质含量影响均较显著(吕新苗等,2006)。

6 生态系统退化的原因

对于气候变化和过度放牧对退化影响的相对作用存在一定争论。实际上,高寒生态系统退化的原因是很复杂的,气候变化和过度放牧的影响依据不同区域而异,如近五十年来,相对于中、东部较高的放牧压力,西部放牧压力很小,说明羌塘高原西部草地退化主要由气候暖干化引起;而中、东部草地退化可能由于过牧或其他人为干扰所致(王景升等,2008)。在高原气候暖干化过程中,表现出高寒草原植被扩张所反映的干旱气候带南向扩张的信息,干旱草原带扩张的速率约为 14.2 km/10 a(王谋等,

2005)。暖干化与增温在一定范围内形成恶性循环,荒漠化过程也不会扭转(Zou *et al.*,2002)。汪诗平(2003)在长江流域考察发现,严重退化的区域主要发生在村庄和水源附近,在这些区域过度放牧是导致严重退化的主要原因;同时在人类活动较少的区域,也发现沼泽草甸疏干化现象。因此,气候暖干化及其引起的冻土环境变化与过度放牧的互动可能更加剧了高寒草地生态系统的退化。

7 结论与存在的关键科学问题

同国内外相关观测和研究相比,青藏高原的研究起步较晚,且由于缺少长期的实地观测和研究资料,使许多观测和研究结果存在很大的不确定性,因此很难进行系统的归纳和统计分析气候变化对高寒草地的综合影响,还需要众多科学工作者的长期、艰苦努力才能逐步实现这一目标。同时利用已观测到的气候变化来预测和评价对高寒植物和植被的潜在影响,以及将已发生的变化纳入到全球变化模型或评价体系中,以更加精确地评估气候变化的长期影响,将是未来要系统深入研究的关键科学问题。

7.1 气候变化模式的不确定性

地面大多气象观测资料显示,青藏高原近五十年来显著增温,但由于气象观测站相对较少,增加了气温变化和暖干化或暖湿化预测的不确定性。特别是利用欧洲中心中尺度天气预报的数据进行再分析发现,青藏高原气温并无明显增加,其原因可能是地面观测资料主要受土地利用变化和工业化进程影响而产生的偏差。因此如何校正现有观测数据,以消除或降低非自然因素的影响将成为未来严峻挑战。

7.2 气候变化对植物和植被影响的不确定性

尽管多数研究结果认为增温增加了植被的盖度,但该正效应依据降水模式的变化而变化。特别是目前绝大多数研究结果都是基于遥感或模型模拟技术获得的,或是通过样带的空间调查模拟时间上的可能结果,缺乏长期的定位观测和可控试验研究,增加了预测气候变化对青藏高原植物和植被影响的不确定性。

7.3 气候变化对青藏高原农牧业生产影响的不确定性

总体上增温可能有利于农牧业的生产,但极端气候变化的频率和强度随之增加,将大大增加自然灾害的危害程度。特别是由于技术、资金、生活方式等的制约,使得该地区的农牧民对气候变化的不利

影响更敏感,因此,特别需要提高农牧民应对气候变化的适应能力,降低气候变化影响的不确定性。

7.4 高寒草地退化原因的不确定性

基于不同技术和尺度上的监测结果对“退化”内涵的解释不一致,如遥感主要以 NDVI 作为代用指标,主要反应的是植被盖度的信息,而很难揭示植物种类组成的变化;相反,在草原生态学研究 and 草地畜牧业生产中,植物种类组成是很重要的信息,往往严重退化的草地因毒杂草盖度较大而被遥感信息解读为良好的草原。因此迫切需要进行定量可控的试验,揭示气候变化和放牧的各自影响大小及其可能的互作效应,从而进一步阐明高寒草地的退化过程和机理。

7.5 气候变化背景下高寒草地的碳源/汇的不确定性

这方面的试验研究刚刚起步,且大多是针对碳循环过程中的一个环节开展,很难从生态系统的角度来回答未来气候条件下高寒生态系统的碳源/碳汇及其变化机理等问题。利用不同的模型进行模拟研究也未得出一致性结果。因此,高寒草地的固碳潜力及其对气候变化的响应仍存在极大的不确定性。

参考文献:

Chen LQ(陈利群), Liu CM(刘昌明). 2007. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River(黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响)[J]. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), **27**(4):559—565

Frauenfeld OW, Zhang TJ, Serreze MC. 2005. Climate change and variability using European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis(ERA-40) temperatures on the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, **110**(D02101D2)

Johns TC, Carnell RE, Crossley JF, et al. 1997. The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: Model description, spin-up and validation[J]. *Clim Dynam*, **13**(2):103—134

Klein JA, Harte J, Zhao XQ. 2004. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. *Ecol Lett*, **7**(12):1 170—1 179

Liu XD, Chen BD. 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *Int J Climatol*, **20**(14):1 729—1 742

Luo CY, Xu GP, Chao ZG, et al. 2010. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau[J]. *Global Change Biol*, **16**(5):1 606—1 617

Lü XM(吕新苗), Zheng D(郑度). 2006. Impacts of global change on the alpine meadow ecosystem in the source region of the Yangtze river(气候变化对长江源地区高寒草甸生态系统的影响)[J]. *Resour Environ Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), **15**(5):603—607

Li HM(李红梅), Ma YS(马玉寿), Wang YL(王彦龙). 2010. Influences of climate warming on plant phenology in Qinghai Plat-

eau(气候变暖对青海高原地区植物物候期的影响)[J]. *J Appl Meteorol Sci* (应用气象学报), **21**(4):500—505

Li L(李林), Li FX(李凤霞), Guo AH(郭安红), et al. 2006. Study on the climate change trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 Years(近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究)[J]. *J Nat Resour* (自然资源学报), **21**(1):80—85

Li YN(李英年), Wang QJ(王启基), Zhou XM(周兴民). 1998. The environmental characteristics analysis of plant community at Alpine Meadow(高寒草甸植物群落的环境特征分析)[J]. *Arid Zone Res* (干旱区研究), **15**(1):54—58

Li YN(李英年), Zhao L(赵亮), Zhao XQ(赵新全), et al. 2004. Effects of a 5-years mimic temperature increase to the structure and productivity of kobresia humilis meadow(5 年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化)[J]. *Acta Agrestia Sin* (草地学报), **12**(3):236—239

Li YN(李英年), Wang QJ(王启基), Zhao XQ(赵新全). 2000. The influence of climatic warming on the climatic potential productivity of Alpine Meadow(气候变暖对高寒草甸气候生产潜力的影响)[J]. *Acta Agrestia Sin* (草地学报), **8**(1):23—29

Luo TX(罗天祥), Li WH(李文华), Leng YF(冷允法). 1998. Estimation of total biomass and potential distribution of net primary productivity in the Tibetan Plateau(青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布)[J]. *Geograph Res* (地理研究), **17**(4):344—377

Ni J. 2000. A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change[J]. *Mt Res Dev*, **20**(1):80—89

Niu T(牛涛), Liu HL(刘洪利), Song Y(宋燕), et al. 2005. Study on decade change of climate shift from warm-dry period to warm-wet period over Tibetan Plateau(青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代变化特征研究)[J]. *J Appl Meteorol* (应用气象学报), **16**(6):763—771

Piao SL(朴世龙), Fang JY(方精云), Guo QH(郭庆华). 2002. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982—1999(1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化)[J]. *J Nat Resour* (自然资源学报), **17**(3):373—380

Qiu D(邱丹), Zhang GS(张国胜). 2000. Influence of Qinghai-Tibet Plateau climate variation on cold plateau grassland ecologic system in southern Qinghai area(青藏高原气候变化对青南地区高寒草地生态系统的影响)[J]. *Qinghai Sci Technol* (青海科技), **7**(2):23—25

Sun R(孙睿), Zhu QJ(朱启疆). 2001. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China(气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究)[J]. *J Remote Sensing* (遥感学报), **5**(1):58—61

Shi PL, Sun XM, Xu LL, et al. 2006. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Sci China Ser D*, **49**:207—218

Tan K, Ciais P, Piao SL, et al. 2010. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands[J]. *Global Biogeochem Cy*, **24**(GB1013)

Tian YQ(田玉强), Ou YH(欧阳华), Song MH(宋明华). 2007. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in alpine ecosystems on Tibetan Plateau transect(青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子)[J]. *J*

- Zhejiang Univ: Agric & Life Sci (浙江大学学报·农业与生命科学版), **33**(4): 443—449
- Wang GX(王根绪), Li YS(李元首), Wu BQ(吴青柏). 2006. Relationship between frozen soil and vegetation and effect on Alpine Ecosystem in Qinghai Tibet Plateau permafrost area (青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响)[J]. *Sci Chin: Ser D Earth Sci* (中国科学·D 辑地球科学), **36**(8): 743—754
- Wang GX(王根绪), Hu HC(胡宏昌), Wang YB(王一博). 2007. Response of alpine cold ecosystem biomass to climate changes in permafrost regions of the Tibetan Plateau (青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应)[J]. *J Glaciol Geocryol* (冰川冻土), **29**(5): 671—679
- Wan JS(王景升), Zhang XZ(张宪洲), Zhao YP(赵玉萍). 2008. Spatio-temporal pattern of climate changes in northern Tibet's Qiangtang Plateau (藏北羌塘高原气候变化的时空格局)[J]. *Resour Sci* (资源科学), **30**(12): 1 852—1 859
- Wang JS(王景升), Zhang XZ(张宪洲), Zhao YP(赵玉萍). 2010. Spatiotemporal pattern of alpine grassland productivity in Qiangtang Plateau (羌塘高原高寒草地生态系统生产力动态)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **21**(6): 1 400—1 404
- Wang M(王谋), Li Y(李勇), Bai XZ(白宪洲). 2004. The impact of global warming on vegetation resources in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau (全球变暖对青藏高原腹地草原资源的影响)[J]. *J Nat Resour* (自然资源学报), **19**(3): 331—335
- Wang M(王谋), Li Y(李勇), Huang RQ(黄润秋). 2005. The effects of climate warming on the alpine vegetation of the Qinghai-Tibetan Plateau hinterland (气候变暖对青藏高原腹地高寒植被的影响)[J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **25**(6): 1 275—1 281
- Wang SP(汪诗平). 2003. Vegetation degradation and protection strategy in the "Three rivers fountainhead" area in the Qinghai Province (青海省“三江源”地区植被退化原因及其保护策略)[J]. *Acta Pratacult Sci* (草业学报), **12**(6): 1—9
- Wang YB(王一博), Wang GX(王根绪), Chang J(常娟). 2004. Impacts of human activity on permafrost environment of the Tibetan Plateau (人类活动对青藏高原冻土环境的影响)[J]. *J Glaciol Geocryol* (冰川冻土), **26**(5): 523—527
- Xia WP(夏武平), Zhou XM(周兴民), Liu LK(刘季科). 1991. Biological communities of alpine meadow area (高寒草甸地区的生物群落)//Study of Alpine Meadow Ecosystem (高寒草甸生态系统研究)[M]. Beijing (北京): Science Press (科学出版社): 1—7
- Xiang B(向波), Miao QL(缪启龙), Gao QS(高庆先). 2000. Study on the relationship between climate change and vegetation index in Qinghai Tibetan Plateau (青藏高原气候变化与植被指数的关系研究)[J]. *J Sichuan Meteorology* (四川气象), **21**(1): 29—36
- Xu XK(徐兴奎), Chen H(陈红), Levy JK. 2008. Characteristics of temporal and spatial variation of vegetation cover in Qinghai Tibet Plateau and its cause analysis under the global warming (气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析)[J]. *Chin Sci Bull* (科学通报), **53**(4): 456—462
- Yang YH(杨元合), Rao S(饶胜), Hu HF(胡会峰), et al. 2004. Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau (青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系)[J]. *Chin Biodiver* (生物多样性), **12**(1): 200—205
- Yang YH(杨元合), Piao SL(朴世龙). 2006. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau (青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系)[J]. *J Plant Ecol* (植物生态学报), **30**(1): 1—8
- Yang YH, Fang JY, Smith P, et al. 2009. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004 [J]. *Global Change Biol*, **15**(11): 2 723—2 729
- Yang JP(杨建平), Ding YJ(丁永建), Shen YP(沈永平). 2004. Climatic features of eco-environment change in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in Recent 40 Years (近四十年来江河源区生态环境变化的气候特征分析)[J]. *J Glaciol Geocryol* (冰川冻土), **26**(1): 7—16
- Yuan JW(袁婧薇), Ni J(倪健). 2007. Plant signals and ecological evidences of climate change in China (中国气候变化的植物信号和生态证据)[J]. *Arid L & Geography* (干旱区地理), **30**(4): 465—473
- Zhang FW(张法伟), Li HQ(李红琴), Li YN(李英年). 2009. Periodic fluctuation features of air temperature, precipitation, and aboveground net primary production of alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau (青藏高原高寒草甸气温、降水和地上净初级生产力变化的周期特征)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **20**(3): 525—530
- Zhang L(张磊), Miao QL(缪启龙). 2007. Precipitation changes in the Tibetan Plateau during the last four decades (青藏高原近 40 年来的降水变化特征)[J]. *Arid Land Geography* (干旱区地理), **30**(2): 240—246
- Zhang XQ(张雪芹), Peng LL(彭莉莉), Zheng D(郑度). 2007. Variation of total cloud amount and its possible causes over the Qinghai-Xizang Plateau during 1971—2004 (1971—2004 年青藏高原总云量时空变化及其影响因子)[J]. *Acta Geographica Sin* (地理学报), **62**(9): 959—969
- Zhang XS(张新时), Liu CY(刘春迎). 1994. The prediction of vegetation change picture under global change in Qinghai Tibet Plateau (全球变化条件下的青藏高原植被变化图景预测)[M]//Global Change and Ecosystem (全球变化与生态系统). Shanghai (上海): Shanghai Science and Technology Press (上海科学技术出版社): 17—26
- Zhang YQ(张永强), Tang YH(唐艳鸿), Jiang J(姜杰), et al. 2006. Soil organic carbon dynamics characteristics of grassland ecosystem in Qinghai Tibet Plateau (青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征)[J]. *Sci Chin: Ser D Earth Sci* (中国科学·D 辑地球科学), **36**(12): 1 140—1 147
- Zhang ZF(张占峰). 2001. Changes of climate resources in Sanjiangyuan region in recent 40 years (近四十年来三江源区气候资源的变化)[J]. *J Qinghai Enviro* (青海环境), **11**(2): 60—63
- Zhao L, Li YN, Xu SX. 2006. Diurnalseasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Glob Change Biol*, **12**: 1 940—1 953
- Zhao XY(赵昕奕), Zhang HY(张惠远), Wan J(万军). 2002. The Impact of climatic change on the climate zones in the Qinghai-Tibetan Plateau (青藏高原气候变化对气候带的影响)[J]. *Sci Geographica Sin* (地理科学), **22**(2): 190—195
- Zhao YP(赵玉萍), Zhang XZ(张宪洲), Wang JS(王景升), et al. 2009. Correlation analysis between NDVI and climatic factors of grassland ecosystems in the northern Tibetan Plateau (下转第 262 页 Continue on page 262)