科学通报 2015 年 第 60 卷 第 32 期: 3025 ~ 3035
专题: 青藏高原环境变化 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来

陈德亮[①②], 徐柏青[①③], 姚檀栋[①③④*], 郭正堂[③⑤], 崔鹏[③⑥], 陈发虎[⑦], 张人禾[⑧], 张宪洲[⑨], 张镱锂[⑨], 樊杰[⑨], 侯增谦[⑩], 张天华[⑪]

① 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;
② Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 46040530, Sweden;
③ 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
④ 冰冻圈科学国家重点实验室, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;
⑤ 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
⑥ 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
⑦ 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
⑧ 中国气象科学研究院, 北京 100081;
⑨ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
⑩ 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
⑪ 西藏自治区环境保护厅, 拉萨 850000
* 联系人, E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

2015-01-17 收稿, 2015-04-23 接受, 2015-09-07 网络版发表
中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)(KFJ-EW-STS-074)、中国科学院战略先导专项(B 类)(XDB03030100)、国家自然科学基金重大项目(41190081)和"第三极环境(TPE)"国际计划资助

摘要 基于环境代用指标、观测数据和相关统计资料, 从气候、水体、生态系统、陆表环境、人类活动影响和灾害风险6个方面, 采用温度、降水、冰川、积雪、湖泊等26项指标内容, 归纳了冷/暖、干/湿等60项指标特征, 揭示了青藏高原过去2000年和现代环境变化的基本事实, 重点评估了环境变化和人类活动影响, 同时预估了未来100年环境的不同情景. 本文所用资料全部来自公开发表的科学文献和省部级及以上的统计数据, 是首次青藏高原环境变化科学评估的简要版本, 体现了《青藏高原环境变化科学评估报告》的基本框架、指标体系和主要结论, 反映了当今科学界对青藏高原环境变化的科学认知水平.

关键词
青藏高原
环境变化
科学评估
框架和指标
政策

全球科学界一直在积极研究气候变化等环境问题及其阈值[1], 确认自然和人类活动对环境影响的相对贡献, 预估未来环境的可能变化[2], 以期为解决环境问题提供科学依据. 平流层臭氧空洞的科学发现与政府间《蒙特利尔议定书》的签订和执行是解决环境问题的一个成功案例. 这一成功案例的基础就是以诺贝尔奖获得者P. Crutzen, M. Molina和F. Rowland三人为主的科学发现为决策层提供了非常坚实的科学依据. 然而, 其他许多环境问题的起因和应对更为复杂, 不同学派的观点往往众说纷纭、甚至互相矛盾, 这使得政策制定者和决策者在制定政策和行动计划时无所适从. 因此, 如何有效地为政策制定者提供权威的科学证据是科学界面临的一个巨大挑战.

近年来, 人们逐渐认识到复杂起因的环境问题的解决和应对方案的提出有赖于科学共同体的协同努力, 而科学评估是应对上述挑战的强有力工具. 从一系列多样化的、有时可能是相互矛盾的指标和观点中提炼出与决策有关的共识是科学评估的一个共同特征. 政府间气候变化专门委员会(IPCC)和千年生态系统的评估报告(MA)开科学评估之先河[2,3], 在国际层

引用格式: 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025–3035
Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3025–3035, doi: 10.1360/N972014-01370

面和全球尺度提供了两个成功案例. 此后, 相继提出与正在实施的全球生物多样性和生态系统服务评估[4]及一系列区域性的气候变化评估, 如北极气候影响评估[5]、波罗的海流域气候变化评估[6]、中国西部环境演变评估综合报告[7]、第二次气候变化国家评估报告[8]等, 使得科学评估这一新的方法不断发展和完善.

在全球变化的背景下, 亚洲正经历着许多环境问题, 青藏高原的环境问题尤为突出[9,10]. 为了应对和解决这些问题, 必须对青藏高原环境变化进行一次综合科学评估已成为科学家和决策者的共识. 大家同时认为, 这个评估需要回答以下4个问题: (1) 过去特别是近几十年来青藏高原的环境是如何变化的? (2) 人类活动对环境有何影响? (3) 未来的环境将如何变化? (4) 如何应对环境变化及其产生的影响? 《青藏高原环境变化科学评估》的目标是立足于已有的研究成果, 评估青藏高原过去、现代和未来的环境变化与人类活动影响. 评估的核心是青藏高原环境变化已经产生的重大影响、未来环境变化的情景和具有潜在重大影响的环境事件.

1 青藏高原环境变化科学评估的指标体系

以IPCC和MA评估为代表的两个案例, 都采用由驱动-响应-影响链为中心的框架来考察多种驱动因素对环境变化和人类福祉的影响. 《青藏高原环境变化科学评估》与上述国际评估报告的不同之处在于将环境与人类活动放在同一个系统中, 没有刻意将各种环境变化因素区分为驱动和响应两大类. 尽管气候变化是其他环境变化的主要驱动因素, 但其他环境因素、特别是人类活动的影响在受到气候变化驱动的同时, 也影响着区域环境和气候变化过程.

《青藏高原环境变化科学评估》基本框架的核心是由反映环境和人类活动相互作用的6类环境指标组成的指标体系, 包括气候、水体、生态系统、陆表环境、人类活动影响和灾害风险(表S1). 基于这一环境指标体系, 本文揭示了青藏高原过去和现代环境变化的基本事实, 重点评估了气候和人类活动对环境的影响, 同时预估了未来环境变化的趋势.

2 主要科学结论

基于代用指标、观测数据和相关统计资料, 对青藏高原过去和现代环境变化的事实及未来情景归纳总结如下.

2.1 气候变化的基本特征是变暖和变湿

在过去2000年时间尺度上, 青藏高原的温度变化整体上呈波动上升趋势, 但出现了时间长度不等的冷、暖变化, 其中公元3~5世纪、15~19世纪较为寒冷, 12世纪中叶至14世纪末较为温暖. 20世纪以来气候快速变暖, 近50年来的变暖超过全球同期平均升温率的2倍, 达到每10年0.3~0.4℃, 是过去2000年中最温暖的时段(图1(a)).

青藏高原降水量在南部和北部的变化方式存在显著差异, 甚至呈现相反的趋势, 近期表现为北部明显增加, 南部有减小趋势(图1(b)). 但青藏高原降水量与温度的对应关系整体上表现为暖湿和冷干的组合特征, 在过去2000年中, 整体上呈变湿的趋势. 公元8世纪初至10世纪末为一个持续时间较长的干旱期, 而13世纪末至16世纪末为相对湿润期. 近期降水量总体呈现增加趋势, 每10年增加2.2%.

2.2 水循环加强是水体对气候变暖和变湿的响应

在过去2000年中相对寒冷的气候阶段, 青藏高原冰川普遍前进, 主要发生在3个时段: 公元200~600年、800~1150年和1400~1920年; 20世纪以来的增温使青藏高原冰川整体后退, 至2000年, 青藏高原的冰川面积相对于20世纪80年代时的面积减少了约20%(图2). 其中以喜马拉雅山和藏东南地区冰川后退与物质亏损最为显著; 但由于同期降水量的增加, 青藏高原北部冰川后退幅度较南部小, 在喀喇昆仑和西昆仑地区, 冰川较为稳定, 甚至出现了冰川前进和物质余盈[19].

近50年来, 青藏高原的积雪呈现先增加后减少的变化: 1960~1990年青藏高原的积雪日数和雪水当量均呈增加趋势, 积雪日数增加了13 d, 雪水当量增加了1.5 mm; 1990年以来出现减少趋势, 1990~2004年积雪日数减少了20 d, 雪水当量减少了1.2 mm (图3).

20世纪90年代以前, 青藏高原湖泊的数量和面积较为稳定. 之后, 湖泊的数量增加、面积扩张: 1990~2010年, 面积大于1 km^2的湖泊数量由1070个增加到1236个; 总面积由39700 km^2增加到47400 km^2. 2003~2009年, 湖泊水位平均以0.14 m a^{-1}的速率上升, 湖泊水量以8.0 Pg a^{-1}的速率增加. 青藏高原

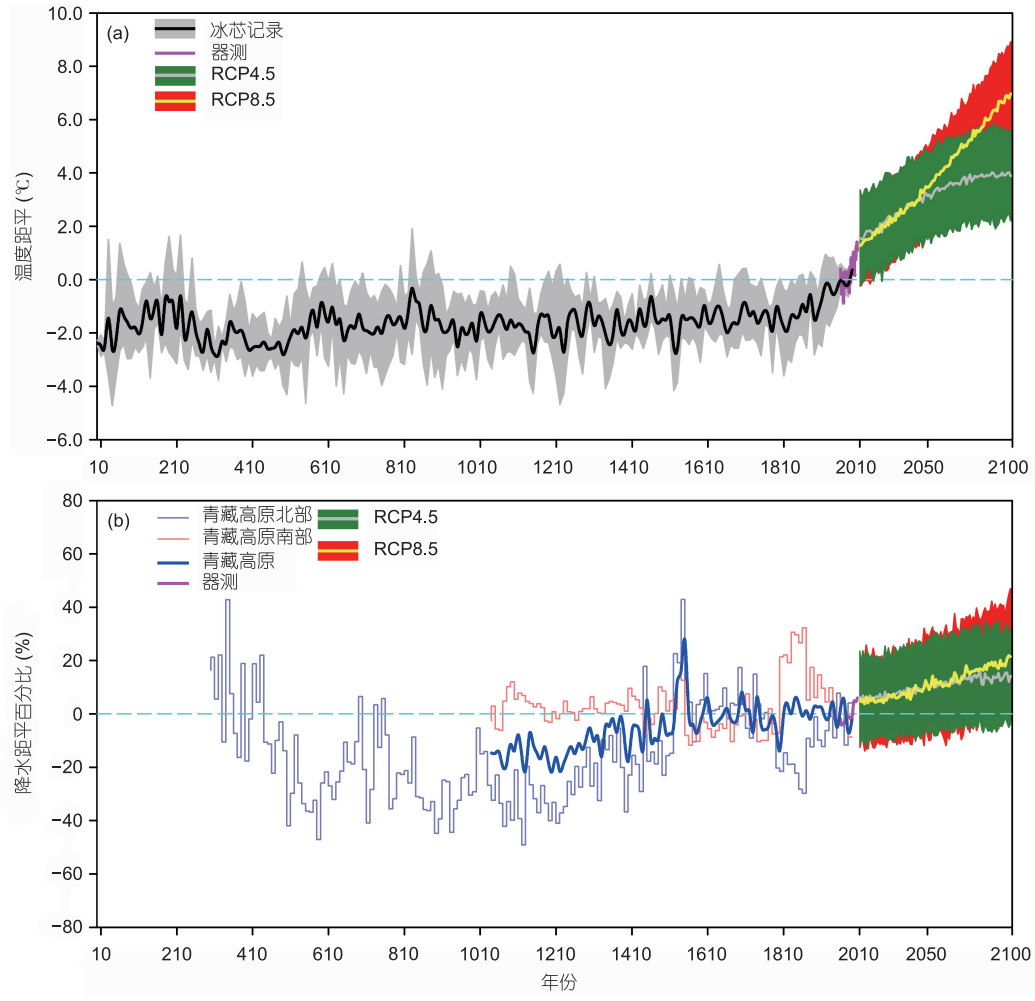

图 1 青藏高原温度、降水量变化，基准期为 1961~1990 年. (a) 温度变化. 冰芯温度记录为敦德[11]、古里雅[12]、普若岗日[13]和达索普[14]4 根冰芯的整合，黑色实线为平均值，灰色阴影区的上限为最大值、下限为最小值；器测温度(绛紫色实线)为青藏高原 95 个气象站点 1960~2012 年的年平均气温；黄色实线为RCP8.5 情景下第 5 次耦合模式比较计划(CMIP5)中 21 个全球气候模式对青藏高原温度预估结果的平均值，红色阴影区为预估结果的标准偏差范围[15]；灰色实线为RCP4.5 情景下第 5 次耦合模式比较计划(CMIP5)中 21 个全球气候模式对青藏高原温度预估结果的平均值，绿色阴影区为预估结果的标准偏差范围[15]；(b) 降水量变化. 蓝色细线为古里雅[12]和普若岗日[16]冰芯净积累量平均值，代表青藏高原北部降水量变化；红色细线为达索普冰芯净积累量[17]和朗县树轮[18]降水量重建数据的平均值，代表青藏高原南部降水量变化；蓝色粗线为北部和南部降水量距平的平均值；器测降水量(绛紫色实线)为青藏高原 95 个气象站点 1960~2012 年降水量距平的平均值；黄色实线为RCP8.5 情景下第 5 次耦合模式比较计划(CMIP5)中 21 个全球气候模式对青藏高原降水量预估结果的平均值，红色阴影区为预估结果的标准偏差范围[15]；灰色实线为RCP4.5 情景下第 5 次耦合模式比较计划(CMIP5)中 21 个全球气候模式对青藏高原降水量预估结果的平均值，绿色阴影区为预估结果的标准偏差范围[15]

Figure 1 Variations of temperature and precipitation on the Tibetan Plateau relative to 1961–1990 mean. (a) Temperature time series. Ice core temperature record is an integrated curve from Dunde[11], Guliya[12], Puruogangri[13] and Dasuopu[14] ice core record. Black line is the average value, and the top and bottom bounds of the shaded area are the maximum and minimum of the annual value; instrument recorded temperature (pourpre curve) is the annual average during 1960–2012 from 95 meteorological stations on the Tibetan Plateau; the yellow curve is the average of ensembles of projections for the Tibetan Plateau temperature using 21 GCMS from CMIP 5 for RCP8.5, and red shaded area shows the range of standard deviation for the projections[15]; the grey curve is the same as the yellow curve, but for RCP4.5, with the green shaded area representative of the range of standard deviation for the projection[15]. (b) Precipitation time series. The thin blue curve is the average net accumulation of Guliya[12] and Puruogangri[16] ice cores, indicative of the precipitation variation in the northern Tibetan Plateau; the thin red curve is the average from Dauopu ice core net accumulation[17] and tree-ring record reconstructed precipitation in Langxian[18], indicative of the precipitation variation in the southern Tibetan Plateau. The blue line is the average of the precipitation anomalies in both the northern and southern Tibetan Plateau; instrument recorded precipitation (pourpre line) is the average of precipitation anomalies during 1960–2012 from 95 meteorological stations on the Tibetan Plateau. the yellow curve is the average of ensembles of predictions for the Tibetan Plateau precipitation using 21 GCMS from CMIP 5 for RCP8.5, and red shaded area shows the range of standard deviation for the predictions[15]; the grey curve is the same as the yellow curve, but for RCP4.5, with the green shaded area representative of the range of standard deviation for the predictions[15]

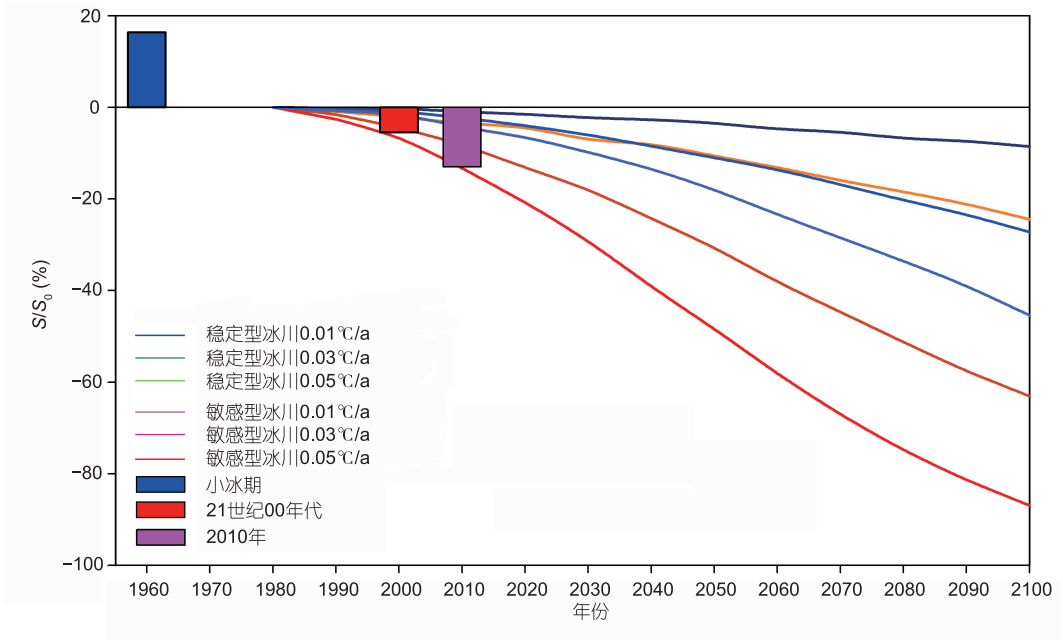

图 2 青藏高原冰川面积变化与预估, 基准期为 20 世纪 80 年代. 纵坐标表示任意年代冰川面积(S)与 20 世纪 80 年代冰川面积(S_0)比值. 小冰期冰川面积是根据已发表的青藏高原各个山脉小冰期以来冰川面积变化数据、以各山脉冰川面积为权重的加权平均值; 21 世纪最初 10 年冰川面积为Yao等人[19]发表的数据; 2010 年前后冰川面积为第二次冰川编目数据; 冰川面积未来变化的预估结果来自谢自楚等人[20]的发表数据

Figure 2 Variation and prediction of the glacier area on the Tibetan Plateau relative to the area of 1980s. *Y*-axis indicates the ratio of glacier area of arbitrary time (S) to glacier area of 1980s (S_0) in the Tibetan Plateau. Glacial area during the Little Ice Age is the weighted mean of glacial area variations in different mountains in the Tibetan Plateau; glacial area during 2000s is based on Yao et al. [19]; glacial area data around 2010 is from the Second Glacier Inventory Dataset of China, predictions of future glacial area variation is from Xie et al. [20]

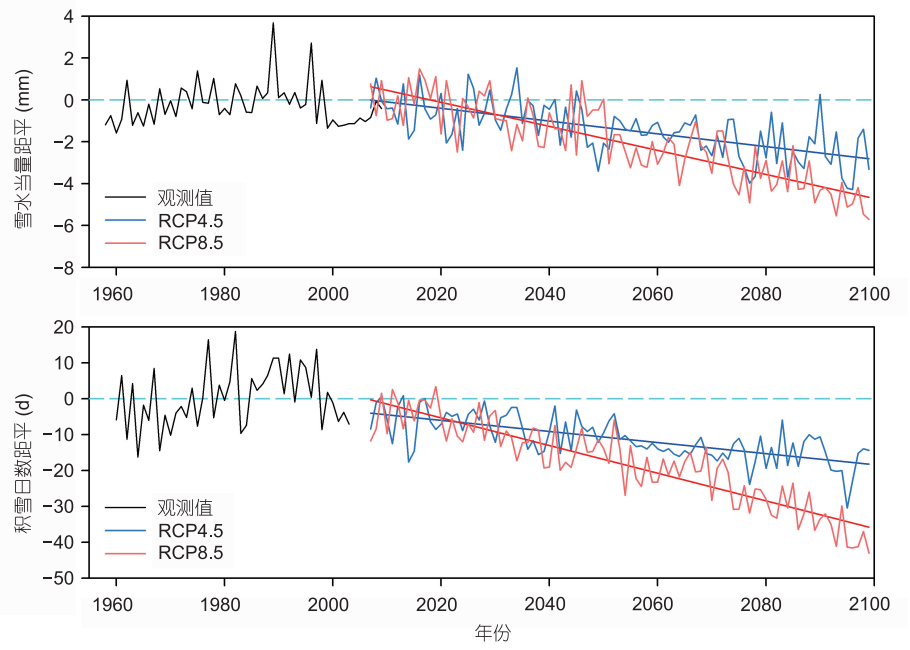

图 3 青藏高原积雪变化与预估, 基准期为 1961~1990 年. 雪水当量观测数据来自Ma和Qin[21]; 积雪日数观测数据来自徐丽娇等人[22]; 预估结果来自Ji和Kang[23]

Figure 3 Variation and prediction of the snow cover on the Tibetan Plateau relative to 1961–1990 mean. Observation snow-water equivalent data is from Ma and Qin [21]; observed snowy days is from Xu et al. [22]; projection is based on Ji and Kang [23]

的湖泊变化存在显著的南北差异: 北部湖泊水位显著上升, 南部的雅鲁藏布江流域湖泊水位显著下降.

青藏高原河流径流量在20世纪80年代到21世纪初整体呈现减少趋势, 但是21世纪初以来, 一些河流径流出现增加趋势. 以雅鲁藏布江、怒江和澜沧江为例, 20世纪60年代为丰水期, 20世纪70年代和80年代为枯水期, 除澜沧江以外, 20世纪90年代以来为丰水期(图4). 冰川、冻土的加速消融可能是引起20世纪90年代以来青藏高原南部河流径流量增长的主要原因.

2.3 生态系统总体趋好是现代环境变化的重要特征

气候变暖使得青藏高原寒带、亚寒带东界西移, 南界北移, 温带区扩大, 从而导致生态系统总体趋向于变好, 局部变差.

青藏高原草地生态系统的空间格局发生了重要变化, 表现为高寒草原分布面积增加, 而高寒草甸和沼泽草甸显著萎缩; 草地植被物候总体表现为返青期提前, 枯黄期推后, 生长期延长(图5(a)); 草地净初级生产力呈总体增加态势(图5(b), (c)), 1982~2011年的30年间, 共计增长了约20%, 但存在区域上的不平衡, 尤其是最近10年, 青藏高原的西部地区变暖变干, 草地生产力呈减少态势.

青藏高原湿地面积总体上呈减少态势. 1990~2006年青藏高原湿地面积以每年0.13%的速率减少, 总面积减少了约3000 km^2, 呈现出持续退化状态, 其中以三江源地区的湿地退化最为明显; 但2000年以来, 湿地退化幅度明显减缓, 并出现局部逆转趋势.

气候变暖改变了农作物物候和农区种植制度. 过去50年来, 农作物≥0℃的生育期平均每10年延长4~9 d; ≥10℃的生育期平均每10年延长4 d. 20世纪70年代中期以来, 冬小麦适种范围明显增加, 分布海拔上限升高了约130 m, 春青稞种植上限升高了550 m. 两季作物适宜种植的潜在区域扩大, 复种指数增加, 拓展了农牧业结构调整空间, 有利于增加农牧民收入.

青藏高原森林生态系统发生了显著的变化. 1998年以前, 青藏高原森林资源整体上缩减, 表现为森林面积的减小和蓄积量的显著降低; 1998年以后, 森林面积和蓄积量均开始呈较大幅度增长. 天然林保护工程的实施是实现森林面积与蓄积量双增长的主要原因, 同时, 也使得森林老龄林比例减少, 幼中龄林比例增加.

2.4 冻土退化和沙漠化加剧是陆表环境变化的主要特征

随着气候变暖, 青藏高原多年冻土活动层以3.6~7.5 cm a^{-1}的速率增厚(图6(b)), 同时冻土层上限温度也以每10年约0.3℃的幅度升高; 虽然青藏高原的降水量和NDVI[26]总体上呈增加趋势, 但局部地区沙漠化面积扩大、程度加剧, 以江河源区尤为突

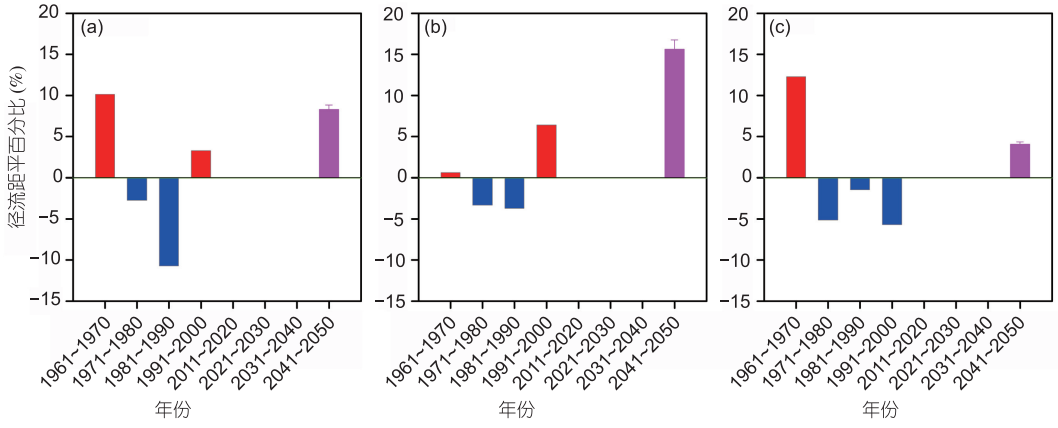

图 4 青藏高原河流径流量变化与预估, 基准期为1961~2000年. 1961~2000年雅鲁藏布江(a)、怒江(b)和澜沧江(c)的径流量分别为奴下水文站、道街坝水文站和昌都水文站每10年平均值; 2041~2050年的径流量为RCP4.5和RCP8.5情景下预估值的平均, 并给出了两种情景预估结果的偏差[24]

Figure 4 Variation and prediction of the river runoff on the Tibetan Plateau relative to 1961–2000 mean. The river runoff values for the YarlungZangbo (a), Salween River (b) and Lancang River (c) during 1961–2000 are the ten-year averages of river runoff measured at, respectively, Nuxia, Daojieba and Changdu Hydrological Station; the river runoff for the period 2041–2050 is the average of predictions for RCP4.5 and RCP8.5, with error bars[24]

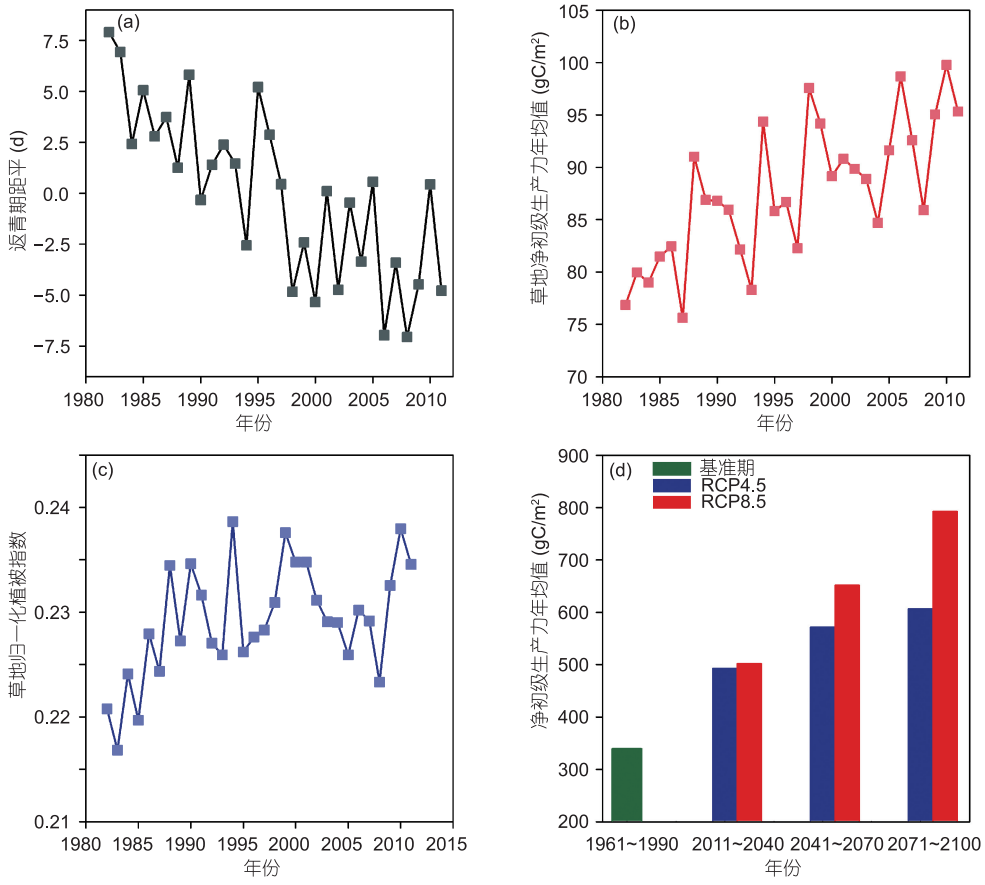

图 5 青藏高原生态系统变化与预估. (a) 1982~2011 年青藏高原草地植被返青期遥感解译[25]; (b) 1982~2011 年青藏高原草地净初级生产力(NPP); (c) 归一化植被指数(NDVI)的变化, 其中NPP是通过CASA模型模拟计算得到[26]; (d) 青藏高原各类生态系统NPP的年均值预估结果[27]

Figure 5 Variation and prediction of the ecosystem on the Tibetan Plateau. (a) Green-up dates of 1998–2011 in the Tibetan Plateau retrieved from remote-sense data[25]; (b) NPP, simulated by CASA model, and (c) NDVI of grassland during 1982–2011 in the Tibetan Plateau[26]; (d) Predicted results of annual mean ecosystem NPP in the Tibetan Plateau[27]

出[33]; 水土流失总体呈现先加剧后略微减轻的趋势.

2.5 近期和远期环境变化的预估有多种情景

以当前(1961~1990年)状态为参照, 考虑多种情景, 分别对青藏高原近期(现今~2050年)和远期(2051~2100年)环境作出如下预估.

未来青藏高原气候变化仍以变暖和变湿为主要特征. 近期和远期年平均温度分别比1961~1990年基准期升高3.2~3.5℃和3.9~6.9℃(图1(a)), 但升温幅度存在区域和季节性差异. 近期和远期年降水量分别比1961~1990年基准期增加10.4%~11.0%和14.2%~21.4% (图1(b)), 最大的降水增幅出现在夏季, 冬季降水增幅最小.

未来青藏高原水体变化表现为: 冰川以后退为主, 敏感型冰川的后退幅度大于稳定型冰川, 以每10年增温0.3℃计算, 在近期和远期, 敏感型冰川的面积相对于20世纪80年代将分别减小31%和63%, 而稳定型冰川面积也将分别减小11%和27%(图2); 积雪以减小为主, 相对于1961~1990年基准期, 在近期, 积雪日数和雪水当量将分别减少10~14 d和0.03~2.06 mm, 在远期则分别减小10~43 d和3.33~5.71 mm (图3); 不同的河流径流将出现不同程度的增加, 降水量和冰川融水的增长是引起径流量增加的主要原因, 在近期, 相对于1961~2000年基准期, 雅鲁藏布江、怒江和澜沧江上游的年径流量将分别增加7.8%~8.8%, 14.5%~16.7%和3.8%~4.4%(图4).

未来青藏高原生态系统变化表现为: 森林和灌丛将向西北扩张, 高寒草甸分布区可能被灌丛挤占, 面积缩小; 种植作物将向高纬度和高海拔地区扩展, 冬播作物的适应范围将会进一步增加, 复种指数提

高. 相对于1961~1990年基准期, 青藏高原的植被净初级生产力在近期和远期将分别增长68%~79%和92%~134%(图5(d)).

未来青藏高原多年冻土面积将进一步缩小, 在近期将减少大约39%, 在远期将减少81%(图6(b)); 活动层厚度将进一步增厚, 近期活动层厚度将由当前的0.5~1.5 m增至1.5~2.0 m, 到远期将增至2.0~3.5 m (图6(b)).

2.6 人类活动对环境有多方面的重要影响

人类活动对环境的影响是多方面的, 可以概括为正面影响和负面影响. 人类活动的负面影响主要是由人口和经济增长、矿产资源开发、农牧业发展、城镇化、旅游业发展、交通设施建设和周边地区污染物排放等引起的. 其中, 青藏高原农牧业发展对生态系统格局与功能的变化产生了一定影响; 矿产开发和城镇发展对局部地区的环境质量影响较大; 每辆汽车每年平均消耗能源及相应的碳排放量高于全国均值; 城市人均污水排放高于全国均值. 周边地区污染物排放的影响在不断加剧, 20世纪50年代以来青藏高原大气污染物如黑碳、重金属等的含量增加了2倍[34,35]. 人类活动的正面影响主要是, 自1960年以来, 不断实施的各类环境和生态建设工程使得环境的负面影响得到遏制, 环境质量呈现逐步改善的趋势. 青藏高原、特别是西藏自治区的能源消费以清洁能源为主, 产业结构以服务业为主, 人类活动对自然资源与生态系统的扰动以及对环境变化的影响总体是有限的, 其污染物环境背景值明显低于人类活动密集区, 与北极相当, 仍为全球最洁净的地区之一[36].

2.7 灾害风险趋于增加

青藏高原环境变化和人类活动引起的灾害风险主要是滑坡、泥石流、山洪、堰塞湖、雪灾等, 具有突发性、季节性、准周期性、群发性、地带性等特点. 在气候变暖和人类活动加强的背景下, 青藏高原自然灾害将趋于活跃, 特别是冰湖溃决灾害增多, 冰川

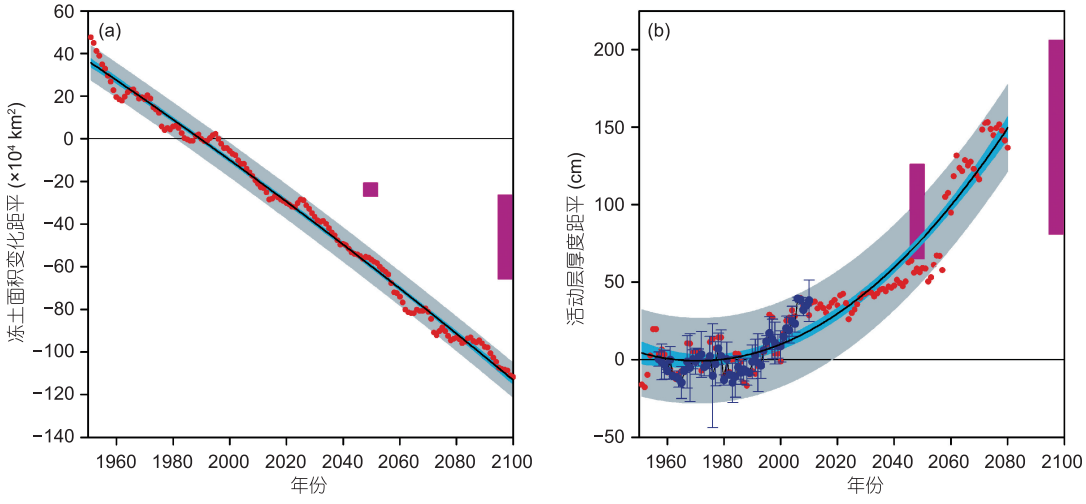

图 6 青藏高原冻土面积、活动层厚度变化与预估, 基准期为 1981~2000 年. (a) 红色圆点为冻土面积的陆面模式计算结果[28], 黑色实线为计算结果的趋势分析, 浅蓝色条带为95%置信区间, 灰色条带为95%预测区间; 粉红色柱状图为近期和远期冻土面积变化的预估值, 上限和下限分别为年增温 0.02 和 0.052℃情形下的预估结果[29]; (b) 蓝色圆点为青藏公路沿线不同观测站点天然陆表环境下多年冻土活动层厚度平均值距平及偏差[30,31], 红色圆点为多年冻土活动层厚度的陆面模式计算结果[29], 黑色实线为计算结果的趋势分析, 浅蓝色条带为 95%置信区间, 灰色条带为 95%预测区间, 粉红色柱状图为近期和远期多年冻土活动层厚度变化的预估值, 上限和下限为A1B, A2 和B1 三种气候变化情景模式预估的最大值和最小值[32]

Figure 6 Variation and prediction of the area and the active layer thickness of the permafrost on the Tibetan Plateau relative to 1981–2000 mean. (a) Red dots indicate the permafrost area calculated from the land surface model [28], black line shows the trend of the calculate results, light blue band shows the 95% confidence level, and grey band shows the 95% prediction zone. Pink bars are the long-term and short-term prediction for the permafrost area, with predictions for 0.02°C/a and 0.052°C/a warming scenarios as the upper and lower limit, respectively[29]. (b) Blue dots are the anomalies and standard errors of the active layer thickness of permafrost at various stations along the Qinghai-Tibet highway[30,31]. Red dots indicate calculation from permafrost active layer thickness from land surface model[29], black line shows the trend for the calculated results, light blue band shows the 95% confidence level and gray band shows the 95% prediction zone. Pink bars are the long-term and short-term prediction for the permafrost active layer thickness, with the maximum and minimum predictions for A1B, A2 and B1 as the upper and lower limit, respectively[32]

泥石流趋于活跃, 特大灾害频率增加, 巨灾发生概率增大, 潜在灾害风险进一步增加.

3 未来展望

本文将目前国际上正在深化和完善的科学评估方法引入到《青藏高原环境变化科学评估》, 并建立了包括6类指标的环境指标体系. 评估过程采用了国际科学评估的通用原则, 由相关领域专家在反复讨论和充分酝酿的基础上共同完成, 并坚持以使用正式发表的科学论文和权威报告的数据为原则, 报告的评审由相关领域资深专家独立完成. 最后, 在综合所有评估工作组和评审专家组意见的基础上, 由核心工作组归纳总结出了本报告的主要结论. 由于这是第一次对青藏高原的环境变化进行综合评估, 在评估过程中, 我们感到评估的目标、程序和结果还有不尽人意的地方. 评估的过程和方法也需要不断地思考和发展. 本文认为将来的环境变化评估应更多地关注和改善如下几个方面: 起始阶段就清晰地定义评估的范围、目标和程序; 邀请更多的社会科学家参与; 与利益攸关方更多地互动; 明确和统一对不确定性的处理和表述方法. 期望今后的科学评估加强下面几个方面的工作.

3.1 进一步强化评估报告的科学基础

科学研究成果的质量直接影响到评估的有效性和影响力[37], 因此评估的科学基础需要得到加强. 为了限制未来环境变化的幅度并适应其不可避免的影响, 需要采取有效的行动, 而坚实的科学研究基础正是提高行动有效性的前提. 现在政府、企业、公民社会等不同层面上的决策者, 都需要采取行动来保护环境和应对环境变化. 然而, 我们过去的科学研究大都只关注环境变化的状态、过程和驱动因素, 对环境变化对社会的影响和人类社会对环境变化的应对不够重视. 而且很多的研究基于单学科的知识系统, 缺乏多学科交叉和综合研究. 我们需要更多学科的参与, 尤其是社会科学家的加盟[38]. 将来, 我们特别需要在以下领域进行更多的研究: 能源消耗、人口和城市化动态、土地利用方式、影响响应的社会经济和行为过程、适应策略、政策机制, 以及其他有关响应的问题. 其次, 评估的准确性、不确定性量化、时空分辨率等还需要进一步提高. 此外, 还需要融入更多的相关指标, 例如本地区的文化等社会因素指标, 将传统知识和社会实践相结合, 利用人与环境互动的历史经验为评估报告提供灵感和新的见解. 同时, 我们应充分重视由于观测数据缺乏或预测能力不足导致的一些指标认知水平低的问题(表S1). 与其他评估报告所起的作用一样[39], 本评估报告的发布将推动与这些认知水平低的指标的相关研究.

3.2 进一步开发新的环境指标

继续开发新的评估指标以更加全面地监测环境变化, 并利用新的指标体系衡量环境变化及其影响. 维护和发展指标体系并将其应用于环境监测, 是一项长期工作, 也是未来评估的基础.

3.3 进一步发展数值模式

数值模式是预测的基石[38]. 目前, 我们已开始由气候系统模式走向地球系统模式[40]. 由于地球系统模式包括了自然环境和人类活动的相互作用, 这给多学科交叉、交流和综合提供了一个有效的平台. 预测能力取决于对环境变化和人类活动相互作用的理解和模拟, 特别要进一步提高在人类活动、灾害风险、生态系统服务、区域气候、水资源, 以及空气和水质量等方面的预测能力, 以满足政策和决策的制定对预测的准确性和可靠性的要求.

3.4 进一步加强科学家与政策制定者的互动

加强科学家与政策制定者的互动是有效制定应对环境变化战略和措施的前提. 目前, 科学研究和应用很大程度上是分离的. 政策制定者很少参与科学研究的过程, 或者通常只在研究过程的后期阶段参与进来. 这妨碍了知识获取从开始阶段就可以直接面向政策需要, 从而降低了研究成果的相关性和研究成果应用的有效性. 为了解决这一问题, 我们需要一个能够让科学家与政策制定者有效合作的平台. 我们还需要推动更多的协同设计和协同决策, 以达到协同创新, 因此需要科学界和其他相关利益攸关方的紧密合作[41].

3.5 进一步加强科学评估的整体设计

期望在未来的科学评估中, 进一步完善评估框架, 明确评估目标, 发展更全面可靠的指标与模型, 设计更合理的情景; 要为以事实为依据的政策和决策制定提供坚实、系统和综合的科学基础, 并为科学

界和其他利益攸关方进行有效互动提供平台, 以产生有实际意义的科学成果; 要通过深化地球系统中各圈层过程和人类活动相互作用的研究[42], 提高预测能力[40], 应对全球科学界所界定的五大挑战[38].

参考文献

1 Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. Nature, 2009, 46: 472–475
2 IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535
3 Millennium Ecosystem Assessment (MA). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005
4 Larigauderie A, Mooney H. The Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services: Moving a step closer to an IPCC-like mechanism for biodiversity. Curr Opin Env Sust, 2010, 2: 9–14
5 ACIA. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 140
6 BACC. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008. 496
7 Qin D H. General Report of Assessment of Environment Change of West China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002 [秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社, 2002]
8 Committee of the Second National Assessment of Climate Change. The Second National Assessment of Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011]
9 Yasunari T, Taniguchi M, Niles D, et al. Asia: Proving ground for global sustainability. Curr Opin Env Sust, 2013, 5: 288–292
10 Yao T D, Thompson G L, Mosbrugger V, et al. Third Pole Environment (TPE). Environ Dev, 2012, 3: 52–64
11 Yao T D, Thompson L G. Climatic records in Dunde ice core and the temperature changes since 5 ka (in Chinese). Sci China Ser B, 1992, 10: 1089–1093 [姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. 中国科学(B 辑), 1992, 10: 1089–1093]
12 Yao T D, Jiao K Q, Tian L D, et al. Climatic variations since the little ice age recorded in the guliya ice core. Sci China Ser D-Earth Sci, 1996, 39: 587–596
13 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Holocene climate variability archived in the puruogangri ice cap on the central Tibetan Plateau. Ann Glaciol, 2006, 43: 61–69
14 Yao T D, Thompson L G, Duan K Q, et al. Temperature and methane records over the last 2 ka in dasuopu ice core. Sci China Ser D-Earth Sci, 2002, 45: 1068–1074
15 Su F, Duan X, Chen D, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. J Clim, 2013, 26: 3187–3208
16 Yao T D, Duan K Q, Xu B Q, et al. Precipitation record since 1600 AD from ice cores on the central Tibetan Plateau. Clim Past, 2008, 4: 175–180
17 Duan K Q, Yao T D, Wang N L, et al. The difference in precipitation variability between the North and South Tibetan Plateaus (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2008, 30: 726–732 [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究. 冰川冻土, 2008, 30: 726–732]
18 Liu J J, Yang B, Huang K, et al. Annual regional precipitation variations from a 700 year tree-ring record in south Tibet, western China. Clim Res, 2012, 53: 25–41
19 Yao T D, Thompson L G, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nat Clim Change, 2012, 2: 663–667
20 Xie Z C, Wang X, Kang E S, et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2006, 28: 457–466 [谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50 a 变化趋势预测. 冰川冻土, 2006, 28: 457–466]
21 Ma L J, Qin D H. Temporal-spatial characteristics of observed key parameters of snow cover in China during 1957–2009. Sci Cold Arid Reg, 2012, 4: 384–393
22 Xu L J, Li D L, Hu Z Y. Relationship between the snow cover day and monsoon index in Tibetan Plateau (in Chinese). Plat Meteorol, 2010, 29: 1093–1101 [徐丽娇, 李栋梁, 胡泽勇. 青藏高原积雪日数与高原季风的关. 高原气象, 2010, 29: 1093–1101]
23 Ji Z M, Kang S C. Projection of snow cover changes over China under RCP scenarios. Clim Dyn, 2013, 41: 589–600
24 Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. Nat Clim Change, 2014, 4: 587–592

25 Shen M G, Zhang G X, Cong N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. Agr Forest Meteorol, 2014, 180-189: 70–81

26 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agr Forest Meteorol, 2014, 189-190: 11–18

27 Guo Y Q. Simulation of the impact of climate change to the vegetation succession and productivity in the Tibetan Plateau (in Chinese). Master's Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012 [郭亚奇. 气候变化对青藏高原植被演替和生产力影响的模拟. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2012]

28 Guo D L, Wang H J, Li D. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century. J Geophys Res, 2012, 117: D05106

29 Nan Z T, Li S X, Cheng G D. Prediction of permafrost changes on Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2004, 34: 528–534 [南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100 a 青藏高原多年冻土变化情景预测. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 528–534]

30 Li R, Zhao L, Ding Y J, et al. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region. Chin Sci Bull, 2012, 57: 4609–4616

31 Wu Q B, Zhang T J. Changes in Active Layer Thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995–2007. J Geophys Res, 2010, 115: D09107

32 Zhang Z Q, Wu Q B. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2012, 34: 505–511 [张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测. 冰川冻土, 2012, 34: 505–511]

33 Dong Z B, Hu G Y, Yan C Z, et al. Desertification in the River Sources (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [董治宝, 胡光印, 颜长珍, 等. 江河源区沙漠化. 北京: 科学出版社, 2012]

34 Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 22114–22118

35 Kaspari S, Mayewski P A, Handley M, et al. Recent increases in atmospheric concentrations of Bi, U, Cs, S and Ca from a 350-year Mount Everest ice core record. J Geophys Res, 2009, 114: D04302

36 Wang X P, Gong P, Yao T D, et al. Passive air sampling of organochlorine pesticides polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers across the Tibetan Plateau. Environ Sci Technol, 2010, 44: 2988–2993

37 Glaser G. Base sustainable development goals on science. Nature, 2012, 491: 35

38 Reid W, Chen D L, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. Science, 2010, 330: 916–917

39 Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the millennium ecosystem assessment. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 1305–1312

40 Shapiro M A, Shukla J, Brunet G C, et al. An Earth-system prediction initiative for the 21st century: An international interdisciplinary initiative to accelerate advances in knowledge, prediction, use and value of weather, climate and Earth-system information. Bull Amer Meteorol Soc, 2010, 91: 1377–1388

41 Future Earth. Future Earth Initial Design: Report of the Transition Team. Paris: International Council for Science (ICSU), 2013

42 Leemans R, Asrar G, Canadell J G, et al. Developing a common strategy for integrative global change research and outreach: the Earth System Science Partnership (ESSP). Curr Opin Env Sust, 2009, 1: 4–13

Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau

CHEN DeLiang[1,2], XU BaiQing[1,3], YAO TanDong[1,3,4], GUO ZhengTang[3,5], CUI Peng[3,6], CHEN FaHu[7], ZHANG RenHe[8], ZHANG XianZhou[9], ZHANG YiLi[9], FAN Jie[9], HOU ZengQian[10] & ZHANG TianHua[11]

[1] *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[2] *Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 46040530, Sweden;*
[3] *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;*
[4] *State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
[5] *Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
[6] *Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*
[7] *Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*
[8] *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*
[9] *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[10] *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
[11] *Environmental Protection Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China*

This study summarizes the *Assessment Report on Environmental Changes over the Tibetan Plateau*. In that report, a set of indicators under six categories—climate, bodies of water, ecosystem, land surface environment, effect of human activities, and hazard risk—is used to depict past changes, present status, and future scenarios of the Tibetan Plateau environment. Similar to other assessments, that exercise deals with evaluating the existing scientific evidence (typically published in peer-reviewed journals) concerning a policy and/or relevant research issue in the scientific community, with involvement of other stakeholders such as policymakers and users of scientific information. Our summary of the report presents the framework and indicators used, the main findings, and future perspectives of the assessment. An overview of similar international assessments and lessons learned is also provided to view the assessment from policy-related and international perspectives.

Tibetan Plateau, environmental changes, scientific assessment, framework and indicators, policy

doi: 10.1360/N972014-01370

补充材料

表 S1 青藏高原环境变化科学评估指标体系

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.