

青藏高原主要生态系统变化及其碳源/碳汇功能作用*

李文华^① 赵新全^② 张宪洲^③ 石培礼^④ 王小丹^⑤ 赵亮^⑥

①中国科学院院士, ③④研究员, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ②研究员, ⑥副研究员, 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; ⑤研究员, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

*中国科学院院士咨询项目“气候变化对青藏高原环境与生态安全屏障功能影响及适应对策”

关键词 青藏高原; 生态系统; 碳平衡; 气候变化

摘要 根据 NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer) 卫星归一化植被指数(NDVI)数据和 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型的计算结果, 过去 30 年间(1982—2011 年), 青藏高原生长季植被覆盖度和植被净初级生产力(NPP)呈总体上升态势, 植被总体变好。青藏高原生态系统碳汇功能增强, 占全国增加碳汇的 10%左右。气候条件的变化是青藏高原植被总体变好的最为重要的驱动因子, 退牧还草等大型生态工程的生态效应也比较显著。青藏高原植被总体变好的同时, 存在着区域不平衡。植被变差的区域主要集中在海拔较高的、生态更为脆弱的藏北高原、西藏“一江两河”和三江源的部分地区, 尤其是藏北高原西部的高寒草原和高寒荒漠出现了较为严重的草地退化, 其原因是气候变暖变干叠加人类活动(如超载放牧等)的影响。为了应对气候变化和人类活动对青藏高原植被的影响, 应该加强青藏高原生态系统变化长期监测系统与平台建设, 加大生态补偿和大型生态工程的实施力度。

1 引言

青藏高原位于中国西南边陲, 是世界最大、最高的高原, 平均海拔 4 000 m 以上, 号称世界屋脊和地球“第三极”。青藏高原面积约 240 万 km², 约占中国国土面积的四分之一, 从东南到西北, 随着海拔的上升, 在热量与水分的驱动下, 依次分布着森林、灌丛草原、高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠。由于高、寒、早的特点, 青藏高原地区植被生态系统对全球变化十分敏感, 在气候变化和人类活动双重影响下, 青藏高原植被发生了显著变化, 正确认识青藏高原植被生态系统变化机制, 采取适当的方法和技术模式整治藏北草地相关的生态环境问题, 对开展青藏高原生态安全屏障建设, 保证青藏高原生态安全都有重要的意义。

2 青藏高原生态系统变化机制及其碳源/汇效应

2.1 青藏高原地区植被变化趋势

根据 NOAA 卫星数据, 过去 30 年间(1982—2011 年), 青藏高原生长季归一化植被指数(GSNDVI)总体呈上升态势, 这一结果也得到最近 10 年间(2000—2011 年)空间分辨率更高的 MODIS 数据的支持。GSNDVI 表明过去 30 年间青藏高原植被覆盖度增加了 2.4% (图 1)。西藏、青海南部地区植被变好, 下降的地区主要是藏北高原、三江源、新疆部分地区。

从净初级生产力(NPP)的角度来看, 根据代表青藏高原植被现实生产力的遥感模型(CASA 模型)的计算结果, 过去 30 年间(1982—2011 年), 现实 NPP 的多年平均值为 190.0 Tg 碳, 青藏高原植被 NPP 呈总体上升态势, 青藏高原植被也是总体变好, 植被净第一性生产力增加了 16.7%, 现实 NPP 共增加了 49.6 Tg 碳。从空间变化趋势来看, 变差的仅限于藏北高原西部的荒漠草原部分地区, 其他大部分地区变好。

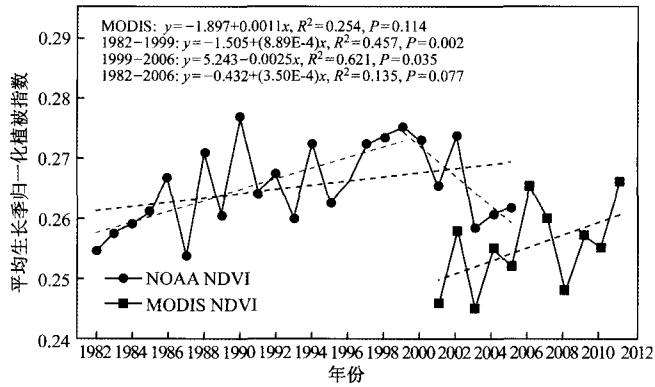


图1 青藏高原植被生长季归一化植被指数(GSNDVI)变化趋势

2.2 青藏高原地区草地变化趋势及其驱动力

根据 NOAA 卫星植被指数(NDVI)数据, 过去30年间(1982—2011年), 青藏高原草地生长季NDVI(GSNDVI)呈总体上升态势, 生长季草地NDVI指数增加了3.3%(图2)。从空间变化看, 植被覆盖度变好的区域主要在西藏的南部、藏北的北部地区, 下降的地区主要是藏北高原、三江源、新疆部分地区和青海东南部地区。从净初级

生产力(NPP)的角度来看, 根据 CASA 模型计算结果, 过去30年间(1982—2011年), 现实高原草地NPP的多年平均值为226.4 Tg碳, 青藏高原草地植被NPP呈总体上升态势, 草地植被净初级生产力增加了19.9%, 现实NPP共增加了40.9 Tg碳。从空间变化趋势来看, 变差的仅限于藏北高原西部的荒漠草原部分地区, 其他大部分地区变好。

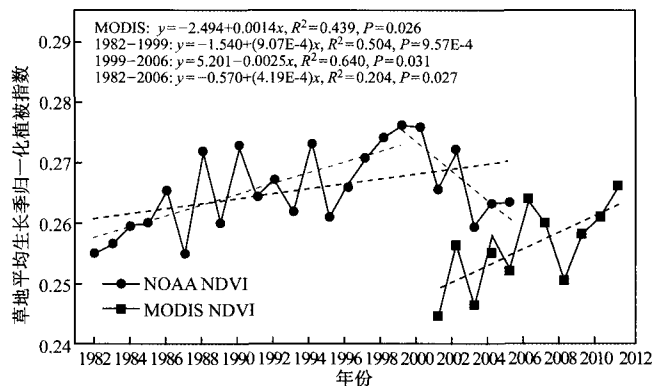


图2 1982—2011年青藏高原草地生长季NDVI(GSNDVI)变化趋势

在全球变暖的背景下, 青藏高原是全球增温最为显著的地区之一。青藏高原海拔4000 m以上的气象台站数据表明, 自20世纪80年代以来的30年间(1982—2011年), 气温上升了1.79℃, 降水增加60 mm (图3)。总体上, 青藏高原东部是变暖变湿, 而高原西部变暖的同时相对变干。气候条件总体有利于植被生长, 但存在区域不平衡性, 高原东部草甸、部分草原区变暖变湿, 草

地生产力显著增加, 而高原西部荒漠草原、部分草原区变暖相对变干, 草地生产力降低。总体上, 气候变化是驱动草地生态系统变化的主导因子, 只是在高原西部部分地区草地退化是由人类活动的影响所致。

2.3 青藏高原植被碳收支变化趋势及其驱动力

从青藏高原原有长期碳收支的涡度相关监

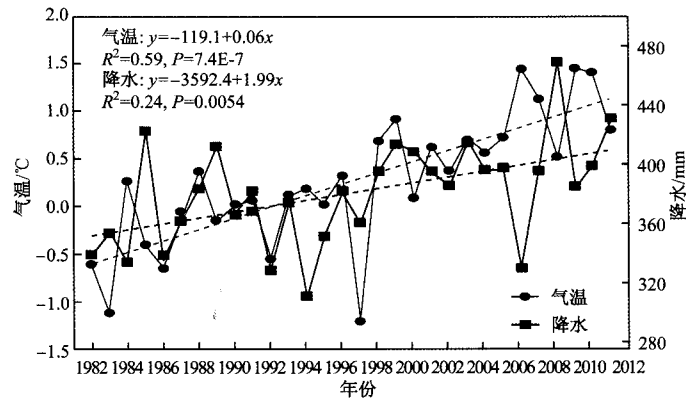


图3 1982—2011年青藏高原植被海拔4 000 m以上地区气温和降水的变化

测结果来看,当雄草原化草甸和海北高寒草甸的碳收支呈现相反趋势。当雄草原化草甸在2004—2011年间表现为碳源,净碳源为 $43.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,而海北高寒草甸在2003—2008年间表现为碳汇,净碳汇为 $61.64 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,主要原因是当雄暖干化导致碳源,而海北暖湿化导致碳汇。根据单个点的几年监测结果尚无法评述青藏高原的碳源/汇的变化,从模型模拟分析看,青藏高原植被仍然是中国重要的净碳汇,20世纪80—90年代青藏高原的碳汇为每年23 Tg碳^[1],90年代青藏高原碳汇为每年31 Tg碳或36 Tg碳^[2-3],占全国碳汇的10%左右(表1)。

表1 青藏高原和全国植被碳收支比较

时段	NEP/(Tg·a ⁻¹)	文献来源
青藏高原 1980s—1990s	23(34)	[1]
青藏高原 1990s	31	[3]
青藏高原 1990s	36	[2]
全国陆地 1980s—1990s	173(177)	[1]
全国陆地 1990s	330	[3]

3 青藏高原退牧还草工程固碳效应

中国退牧还草工程自2003年开始实施,目前可获得数据截止至2010年底。《IPCC 优良做法指南》提供的碳库变化估算方法要求管理措施持续20年(或以上),因此本研究采用修正的IPCC碳汇估算方法,估算2003—2010年8年青藏高原草地围栏工程0~30 cm土壤碳库变化量。

围栏封育以后,围栏内区域草地的生物量及

覆盖度会呈现逐年上升的变化趋势,而相邻的放牧地,受气候或过渡放牧等因素影响,其年际变化曲线呈现上下波动或逐年下降趋势。因此,利用MODIS数据产品的NDVI数据,以年为单位逐栅格研究草地生物量时间序列的变化趋势,辅助以相关限制因子,建立模型,能够在区域尺度上识别出实施退牧还草工程项目的区域。最后将所得结果与青藏高原各区县提供的退牧还草工程实施情况的资料进行核对,校正围栏工程的实际面积范围(表2)。

表2 青藏高原原省份草地面积和围栏工程面积

省份	围栏面积/km ²	草地面积/km ²	百分比/%
四川	33 139.63	110 323.81	30.04
西藏	34 480.00	807 710.81	4.27
青海	63 092.81	410 404.19	15.37
甘肃	16 818.81	90 680.63	18.55
总	147 531.25	1 419 119.44	10.40

围栏措施下,2003—2010年整个青藏高原草地土壤碳库增加了290.9 Tg碳,单位面积固碳量为 $22.04 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。按有关研究结果^[4],青藏高原草地土壤碳库基线值为9.7 Pg碳,而围栏工程面积占草地面积的10.4%(表2),则青藏高原围栏面积范围内的土壤碳储量约为1 008.8 Tg碳。因此,本研究中围栏措施下,退牧还草工程区内草地土壤碳库约增加了28.8%,青藏高原退牧还草工程增加了整个青藏高原3.0%的碳汇。围栏措施下,青海、西藏、四川、甘肃四个省份的草地土壤碳

库增量分别为 171.8 Tg、52.6 Tg、49.9 Tg、16.5 Tg，单位面积土壤固碳量分别为 28.4 Tg·hm⁻²、16.5 Tg·hm⁻²、17.4 Tg·hm⁻²、15.2 Tg·hm⁻²(图 4)，其中青海省草地围栏工程的总固碳量和单位面积固碳量均最高。

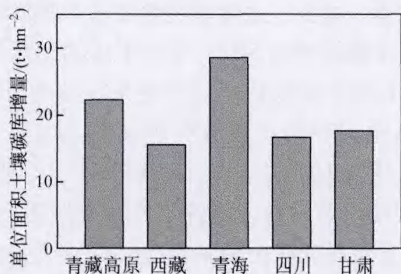


图 4 围栏措施下青藏高原各省草地单位面积土壤固碳增量

4 青藏高原植被恢复措施的固碳效应

4.1 人类干预下高寒草地土壤碳储量变化特征

青藏高原面积巨大，草地土壤有机碳储量高达全国的 23%，占全球土壤碳库的 2%，但因土壤和植被不同而存在着较强的空间异质性，草地退化和土地利用格局的变化引起青藏高原草地有机碳释放。高寒草地土壤系统碳储包括植物根系有机碳和土壤有机碳，高寒草甸草原、高寒草

甸草原和高寒草原总碳储分别为 9 885.21 ± 11.3 g/m²、8 421.55 ± 61.2 g/m²和 4 507.31 ± 68.2 g/m²。不同类型高寒草原植物地下碳储量(0~40 cm)具有明显的差异，高寒草甸草原(896.30 ± 22.1 g/m²)>高寒草原草甸(388.81 ± 29.5 g/m²)>原生草原(335.25 ± 31.7 g/m²)。随着草地的退化，其植物地下根系碳储与原生草地相比明显降低，高寒草甸草原、高寒草原草甸、高寒草原分别下降了 59.9%、32.3%和 57.4% (图 5a)。0~40 cm 土层内的土壤有机碳储量，高寒草甸草原(8 965.25 ± 31.9 g/m²)>高寒草原草甸(8 328.17 ± 53.2 g/m²)>原生草原(4 368.35 ± 42.3 g/m²)。随着草地的退化，土壤有机碳储量呈现明显的降低趋势，高寒草甸草原、高寒草原草甸、高寒草原下降量分别为 12.1%、11.8%和 33.8%，但相比植物根系下降程度有所减轻(图 5b)。草地开垦为人工草地，虽说产草量可显著提高，但其植物地下碳储量下降更为剧烈，由原生草甸—退化草甸—人工草地到农田，0~10 cm 的碳储量占 0~40 cm 的比重依次为：84%、79%、63%和 60%，且随深度增加(0~10 cm 到 10~20 cm)降幅显著(*p*<0.05)，分别达到 86%、89%、58%和 49%。由此可以看出，青藏高原高寒草地具有较高的碳储量，人类的干预引起高寒草地土壤碳储量丢失^[5-6]。

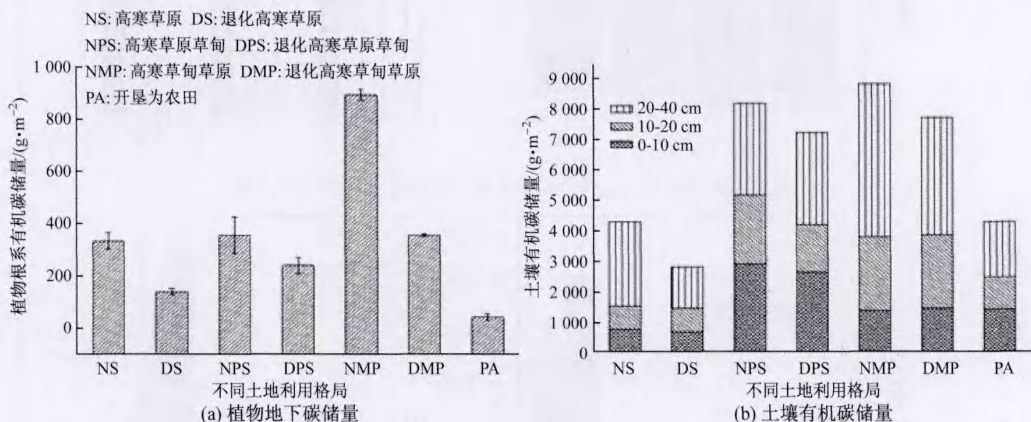


图 5 人类干预对高寒草地土壤碳储量的影响

4.2 恢复退化植被及改变土地利用方式的土壤增汇潜力

以三类原生型高寒草原生态系统为参照，计算各种退化草地类型的理论碳汇潜力，退化高寒

草甸草原、退化高寒草原草甸、退化草原和农田(人工草地)有增汇潜力大小分别为 18.82±0.51 t·hm⁻²、18.15±0.15 t·hm⁻²、14.65±0.78 t·hm⁻²和 1.29±0.21 t·hm⁻²。退化草地增汇潜力最大可达

48.17% (表 3)。分析草地恢复碳增汇来源, 主要通过两个途径, 对于退化草甸和人工草地, 土壤是其生态系统碳增汇的主要来源, 而农田碳增汇的主要来源则是其地下生物量^[6]。

表 3 不同土地利用格局下高寒草原碳储量和理论增汇潜力

土地利用格局	生态系统碳储/ (t·hm ⁻²)	理论增汇潜力/ (t·hm ⁻²)
高寒草甸草原	98.85±0.11*	18.82±0.51
高寒草原草甸	84.21±0.61*	18.15±0.15
高寒草原	45.07±0.68	14.65±0.78
农田(人工草地)	43.77±0.16	1.29±0.21

注: 表中*号表示各土地利用类型的总碳储量与原生草地的总碳储量有显著差异($p<0.05$)

4.3 生态系统管理措施对草地碳汇影响

(1) 合理放牧有利于健康高寒草地生态系统碳固定

不同强度放牧处理对高寒草甸生态系统土壤碳含量的影响研究中, 除了在重度放牧处理土

壤有机碳含量与其他处理之间存在显著差异外, 其他均没有显著影响(图 6(a))。分析土壤微生物特征对不同放牧强度的响应, 适度放牧下土壤有较高的微生物量及微生物熵(图 6(b)), 增加土壤有效碳。另外, 适度放牧改变植物光合产物的分配, 使地下生物量的分配比增大, 从而增加了土壤碳库的来源量。因此, 适度放牧增加了土壤碳库来源, 提高了土壤微生物活性, 加快了碳的周转^[7-8]。

(2) 封育对退化草地生态系统碳库影响

草原封育植被恢复过程是植被和土壤相互作用、相互促进的过程, 逐渐恢复的植被给土壤以保护和调节, 使土壤各个方面的性质得到不断改善。主要表现在土壤紧实层在气候变换(干湿交替、冻融交替)及植物根系不断恢复扩张的作用下逐渐消除, 从而使表层土壤疏松, 通透性增强, 水分养分得到流通, 土壤各方面性质得到改善。通过围栏和补播措施恢复中度退化草地可使土壤有机碳增加 4.5%, 围封建植人工草地措施恢复黑土型退化草地, 可使土壤有机碳增加 89.8%(图 7)。

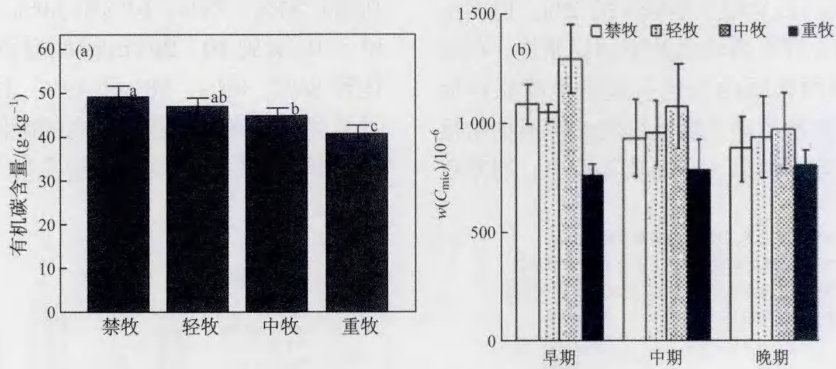


图 6 放牧强度对土壤有机碳含量和土壤微生物活性的影响

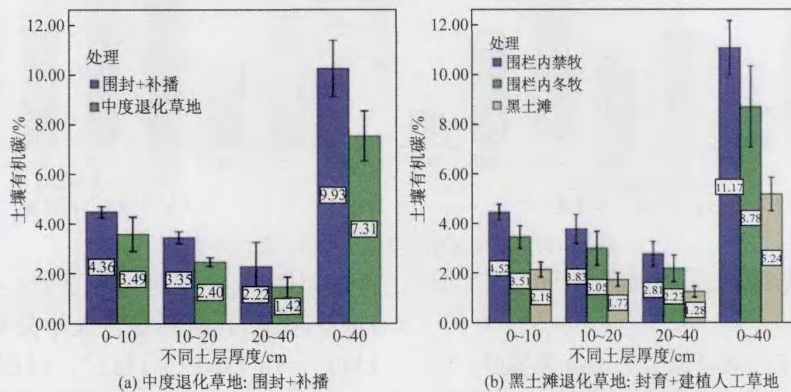


图 7 封育措施对不同退化草地土壤碳库的影响

(3) 退耕还草措施是草地恢复和碳固定的有效措施

在0—9年的退耕还草期间,0~30 cm 土层总有机碳含量变化为5.30%~7.02%。土壤有机碳总量先升高后降低,最大值出现年限建植6—7年,

增汇潜力为41%~44%(表4)。

(4) 不同管理措施下草地增汇潜力

围封、建植人工草地和退耕还草分别可提高草地生态系统碳储量37.1%、15.9%和11.5%(表5)。

表4 退耕还草期间增加的土壤有机碳含量

退耕年限	土壤有机碳					
	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm	
	增加量/(g·kg ⁻¹)	百分比/%	增加量/(g·kg ⁻¹)	百分比/%	增加量/(g·kg ⁻¹)	百分比/%
退耕还草3年	22.4(4.28)	23.62	22.3(4.00)	21.89	19.5(2.88)	17.35
退耕还草6年	25.5(7.42)	40.95	22.7(4.44)	24.30	19.2(2.56)	15.43
退耕还草7年	26.1(7.91)	43.65	21.8(3.55)	19.43	18.5(1.94)	11.69
退耕还草8年	25.4(6.92)	38.19	23.8(5.56)	30.43	18.6(2.03)	12.23
退耕还草9年	20.9(2.80)	15.45	19.9(1.62)	8.87	18.6(1.98)	11.93

表5 不同处理措施下高寒草地固碳潜力

措施	治理前植被类型	恢复后理论植被类型	增汇潜力/%
围封	退化高寒草甸	高寒草甸	49.2
	退化高寒草甸草原	高寒草甸草原	23.5
	退化高寒草原草甸	高寒草原草甸	27.5
	退化高寒草原	高寒草原	48.2
建植人工草地	退化高寒草甸	高寒草甸	28.8
	退化高寒草原	高寒草原	3.0
退耕还草	高寒草原退耕还草区		12.9
	高寒草甸退耕还草		10.1

4 有关思考与建议

基于青藏高原30年来草地变化的特征及其驱动力分析,围绕维持、稳定与提升青藏高原生态安全屏障功能,建议深入开展以下工作:

(1) 加强青藏高原生态系统变化长期监测系统与平台建设

青藏高原地处高寒地区,气候环境严酷,交通不便,长期以来有关青藏高原生态系统变化的实测数据资料极为缺乏,极大地限制了对青藏高原植被历史时期变化特征的分析,因此建立青藏高原生态系统地面监测系统是极为紧迫的。

(2) 建立以适应气候变化的牲畜种群调控技

术与模式

气候变化对青藏高原草地产生了显著影响,尤其对于藏北高原西部地区脆弱的草地系统,气候变暖变干不利于植被生长,叠加超载放牧因素,会导致草地严重退化;因此,建议利用生态补偿手段严格控制藏北高原西部牲畜种群数量,国家生态补偿政策要更多地向藏北高原西部倾斜,而退牧还草工程向东部倾斜。

(3) 建立农牧系统耦合的可持续发展的双赢模式

由于地带性植被分布的限制,藏北高原草地生产力不可能有大幅度的提高,草畜矛盾仍十分

突出。充分利用西藏“一江两河”丰富的水热和土地条件,在西藏河谷农区建设草产品和饲料基地,采取区域间流动和互补的方式,对藏北地区的牲畜进行季节性补饲,缓解草畜矛盾,遏止草地退化。通过实施“南草北上”或“北畜南下”工程不但可以改善藏北地区的生态环境,还可以增加农牧民收入,从而实现生态环境保护和农牧民收入增加的双赢局面。因此,构建西藏生态安全屏障,不要就藏北论藏北,而是要站在“一江两河”看藏北,整体提升青藏高原生态安全屏障功能。

(2013年5月18日收稿)■



参考文献

- [1] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, 458: 1009-1013.
- [2] ZHUANG Q, HE J, LU Y, et al. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: an analysis with a process-based biogeochemical model [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 649-662.
- [3] 王军邦. GLOPEM 与 CEVSA 耦合模型: 发展、验证与应用[M]// 李克让. 中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究. 北京: 气象出版社, 2009.
- [4] 张永强, 唐艳鸿, 姜杰. 青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(12): 1674-1678.
- [5] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J]. *生态学报*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [6] 林丽, 曹广民, 李以康, 等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草甸碳过程的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [7] SUN D S, WESCHE K, CHEN D D, et al. Grazing depresses soil carbon storage through changing plant biomass and composition in a Tibetan alpine meadow [J]. *Plant Soil Environ*, 2011, 57(6): 271-278.
- [8] 陈懂懂, 孙大帅, 张世虎, 等. 放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤微生物特征的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011(1): 73-77.

Change mechanism in main ecosystems and its effect of carbon source/sink function on the Qinghai-Tibetan Plateau

LI Wen-hua^①, ZHAO Xin-quan^②, ZHANG Xian-zhou^③, SHI Pei-li^④, WANG Xiao-dan^⑤, ZHAO Liang^⑥

①CAS Member, ③④Professor, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ②Professor, ⑥Associate Professor, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; ⑤Professor, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract We obtained Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and calculated net primary production (NPP) using the CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model from 1982 to 2011. Overall, vegetation coverage and NPP increased during the growing season in the past 30 years, which indicated that vegetation became better on the Plateau. The carbon sink function enhanced on the Qinghai-Tibetan Plateau. The increment of carbon sink on the whole Qinghai-Tibetan Plateau was equivalent to approximately 10% of that in China. Climate change was the primary driving factor for vegetation change on the Plateau. Various ecological projects (e.g. grazing forbidden) also showed obvious ecological effects. However, there were some regions where vegetation became worse. These regions were mainly centered on the Northern Tibetan Plateau, the Brahmaputra River and its two Tributaries and partial district of Three-River Headwaters Region where ecosystems were more fragile and altitude was higher. Especially, there were worse grassland degeneration in alpine steppe and desert on the western of the Northern Tibetan Plateau, which were attributed to the combined effect of climate change (i.e., warming and drying) and human activities (e.g. overgrazing). Therefore, we should strengthen the construction of long-term monitoring systems and platforms for ecosystem changes and implementation of ecological compensation and projects.

Key words Qinghai-Tibetan Plateau, ecosystem, carbon balance, climate change

(编辑: 沈美芳)