

三江源植被净初级生产力估算研究进展

孙庆龄^{1,2}, 李宝林^{1,2,4}, 李 飞³, 张志军³, 丁玲玲³, 张 涛^{1,2}, 许丽丽^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青海省生态环境遥感监测中心, 西宁 810007;

4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 植被净初级生产力(NPP)作为重要的植被参数和生态指标,能够直观地反映生态环境的变化和区域碳收支水平。鉴于三江源特殊的地理环境和战略地位,众多学者曾应用不同的方法对三江源植被NPP进行了估算,但是由于各方面原因,NPP估算结果存在较大差异。目前,虽在三江源地区开展了大量NPP估算研究,但尚未有相关文章对这些研究进行汇总并加以分析和评价。因此,本文在前人研究成果的基础上,通过综述已有文献,对三江源植被NPP估算的相关方法与结果进行了系统地总结,探讨不同方法在三江源地区的适用性,指出已有方法存在的主要问题,并对现有NPP估算结果进行评估分析,最后提出了未来三江源NPP估算研究亟待加大研究力度的方向。

关键词: 三江源;净初级生产力(NPP);估算方法;NPP模型;生态参数

DOI: 10.11821/dlxb201609011

1 引言

植被生产力是生态系统能量流动和物质循环的基础^[1]。在不同时期,不同学科的研究者从各自不同的角度针对陆地植被生产力提出了不同的概念。在传统的生物量调查研究领域,人们常用一定时期内植被生产的累积量或生物量的变化量来表示植被生产力的大小^[2]。随着区域研究的增多以及对植物生理生态过程的了解加深,总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)和净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)等概念被提出^[3-5]。其中,净初级生产力由于代表了绿色植物在单位时间、单位面积内所能固定的有机物总量,与生态系统碳汇直接相关,并能够用来定量估算地球系统的支持能力和评估生态系统的可持续发展水平,受到广泛关注并成为国际研究计划的核心内容之一^[6-8]。

三江源是长江、黄河及澜沧江的发源地,地理位置介于31°39'N~36°16'N、89°24'E~102°23'E之间,位于青海省南部,包括玉树、果洛、海南、黄南4个藏族自治州的16个县和格尔木市的唐古拉山乡,总面积约36.3万km²(图1)。三江源是中国陆地生态系统最脆弱和敏感的区域之一^[9],平均海拔4000 m以上,具有独特而典型的高寒植被系统,在全球气候变化及植被对气候变化的响应研究中具有重要地位^[10]。在过去几十年内,三江源生态系统退化明显,突出表现为草地退化、土地荒漠化、农牧业产量下降等^[11-13]。

收稿日期: 2016-03-09; 修订日期: 2016-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500205); 国家重点基础研究发展计划(973)(2015CB954103, 2015CB954101) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0500205; National Basic Research Program of China (973 Program), No.2015CB954103, No.2015CB954101]

作者简介: 孙庆龄(1991-), 女, 安徽阜阳人, 博士生, 主要研究方向为生态建模。E-mail: fuqiao_sun@163.com

通讯作者: 李宝林(1970-), 男, 辽宁辽中人, 博士, 研究员, 研究方向为环境遥感与区域建模。E-mail: libl@lreis.ac.cn

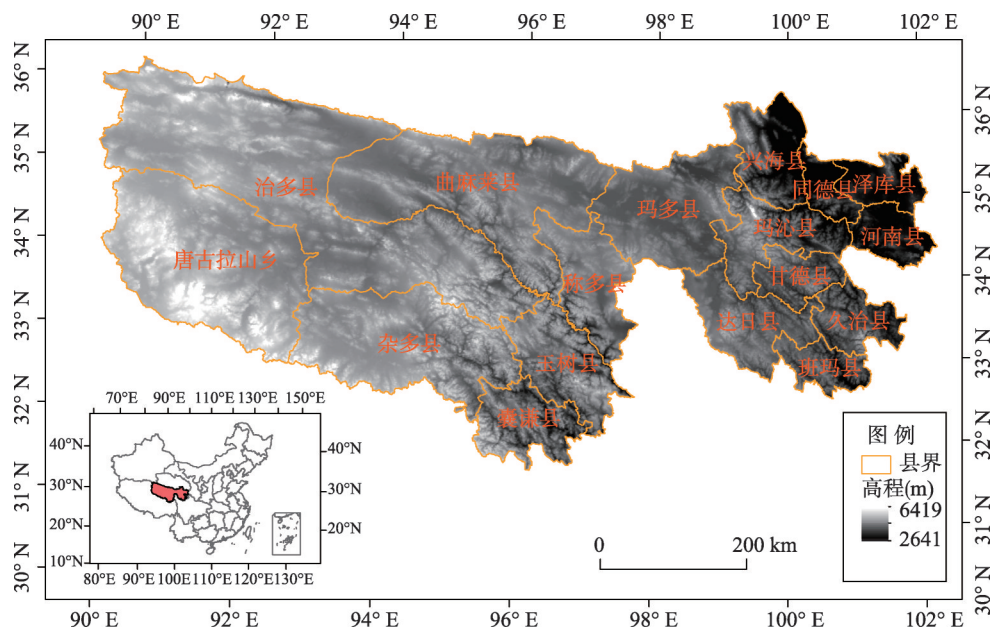


图1 三江源地理位置与范围

Fig. 1 Geographical location and scope of the Three-River Headwater Region

2000年青海省在三江源地区成立了省级自然保护区，2003年批准为国家级自然保护区，2005年国务院规划投资75亿元启动了三江源生态保护与建设工程，实施退牧还草、黑土滩治理、湿地保护等生态项目^[14]。在此背景之下，准确认识三江源植被生产力的变化格局、趋势以及影响因素，对国家生态保护政策的制定以及生态工程成效的评估具有重要意义。

虽然众多学者曾应用不同的方法对三江源植被NPP进行了估算，有力地推进了三江源地区植被生产力水平和区域碳循环的研究工作，但由于各方面原因，植被净初级生产力估算仍具有很大的不确定性，估算结果也存在较大差异。本文旨在前人研究的基础上，系统地总结三江源地区植被NPP的估算方法与结果，探讨不同方法在三江源地区的适用性，提出已有方法在三江源NPP估算中存在的主要问题，并对目前NPP估算结果进行评估分析，最后展望未来三江源地区植被NPP估算研究可能的发展方向。

2 估算方法

自20世纪末期以来，众多学者对三江源地区的植被净初级生产力进行了估算，使用的方法大致可以分为两大类：一是野外测量法；二是模型模拟法。

2.1 野外测量法

野外测量植被净初级生产力一般从测定生物量入手^[15]，包括地上和地下两部分。对于灌木和草本植物（包括农作物），一般采用样方收获法获取地上生物量，且对于落叶草本植物，直接将地上现存量达最大时的生物量作为地上NPP^[16-17]，而对于灌木和常绿草本植物，一般还需结合不同器官的年龄进一步获取当年的地上NPP。至于乔木，通常采用标准木法或相关曲线法测量地上生物量，利用年龄推算法或生长率推算法估测地上NPP^[5]。

地下生物量测量有全挖法、取样法、内生长袋法等，根据地下生物量进一步估算地下NPP的方法有3种：①直接估测活根量的变化和枯死损失量及被食草动物摄取的量，

该方法理论上最接近真实值,但测量难度大,实际应用困难^[18];②采用测量时段内根系生物量最大值与最小值的差来估算NPP,该方法虽然较为简单,但是需要多次测量根系生物量的值^[18];③采用根系周转法,即利用地下生物量与根系周转率来估算地下NPP,该方法在实际应用中最为常见^[19-20]。此外,随着计算机技术和图像处理技术的发展,微根管法被用于地下NPP测量,但是由于代价较高且对操作人员有一定技术要求,因此应用非常有限。

2.2 模型模拟法

NPP估算模型一般被分为3类:①气候统计模型(又称气候相关模型);②遥感参数模型(又称光能利用率模型);③过程模型(又称机理模型)^[21-23]。然而,随着NPP模型的发展,作者认为该分类方法已不能全面且无歧义地概括现有的NPP估算模型:有些统计模型并不是基于气候数据,而是基于遥感植被指数;有些参数化模型也并非基于遥感光能利用率,而是基于气候数据;此外,遥感—过程耦合的NPP模型越来越多且被广泛应用。因此,本文在前述分类系统的基础上,根据模型利用的主要数据源和是否考虑生理生态机制将NPP估算模型划分为4类:气候模型、遥感模型、过程模型和遥感—过程耦合模型。

2.2.1 气候模型 气候模型仅以气候数据为驱动,模拟的植被生产力是潜在植被生产力(或称气候生产力)。根据在三江源地区开展的已有相关研究,气候模型又可进一步分为气候相关模型、气候生产潜力模型和分类指数模型。

气候相关模型通过建立气候因子与NPP之间的回归方程来对NPP进行估算,如郭佩佩等^[24]和李惠梅等^[25]均基于Thornthwaite Memorial模型对三江源植被NPP进行了估算,郭连云等^[26]同时利用Miami模型和Thornthwaite Memorial模型计算了三江源兴海县草地的NPP。

气候生产潜力模型反映的是光、温、水的组合对植被生产力的影响,一般在基于太阳辐射求得光合生产潜力后,通过温度订正得到光温生产潜力,然后再对光温生产潜力进行水分或其他因素订正得到气候生产力,如李惠梅^[27]在考虑了光、温、水3个基本气候要素的基础上,增加气候年际变化及灾害相关的订正因子来估算三江源草地生产力。

分类指数模型(CIM)是将草原综合顺序分类法与NPP模拟相结合的NPP估算模型,它以湿润度K和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温作为模型参数,将NPP与草地类型相对应,通过找到某种草地类型在综合顺序分类法中的位置来确定NPP的大小^[28],如王狮^[29]利用CIM模型对三江源草地NPP进行估算,并认为CIM模型比Miami等气候相关模型的精度更高。

2.2.2 遥感模型 遥感模型根据其建模原理分为遥感统计模型和遥感参数模型。遥感统计模型基于遥感植被指数来反演植被生产力,常用的植被指数包括NDVI和EVI^[30-32]。研究表明,对于高寒草甸,适宜的植被指数为NDVI,而对于高寒草原,EVI可能更为合适^[33]。

遥感参数模型基于Monteith提出的光能利用率的概念^[34],结合光合有效辐射(PAR)、冠层吸收光合有效辐射的比例(FPAR)来估算植被NPP^[35]。它是根据资源平衡的观点建立的,根据该观点,任何对植物生长起限制作用的资源均可用于植被NPP估算并通过转换因子进行联接,遥感参数模型正是利用了PAR这一决定光合作用的重要限制性资源。遥感参数模型在三江源地区的应用非常广泛:张颖等^[36]、吴红等^[37]、蔡雨恋等^[38]、沃笑等^[39]和陈利军^[40]均利用CASA模型估算了三江源地区的植被生产力;肖桐等^[41]、樊江文等^[42]、Fan等^[43]和邵全琴等^[44]则利用GLO-PEM模型对三江源地区的植被净初级生产力进行了模拟。

2.2.3 过程模型 与前两类模型不同,过程模型是从机理上对植物的生理生态过程及其影响因子、反馈机制等进行模拟,大多是将土壤—植物—大气连续体作为一个整体来考

虑,包括光合作用、呼吸作用、蒸发蒸腾、气孔导度等多个子模块。目前,利用过程模型专门对三江源植被NPP进行模拟的研究还未见报道,不过基于过程模型在青藏高原开展的NPP研究已较多:周才平^[44]、Zhuang等^[45]和Yan等^[46]分别利用TEM模型模拟了青藏高原植被的NPP;Zhang等^[47]利用CENTURY模型对青藏高原的植被生产力和土壤有机碳进行了研究;叶建圣^[48]和亓伟伟等^[49]分别基于Biome-BGC模型模拟了青藏高原的NPP变化和增温对高寒草甸固碳通量的影响;Piao等^[50]则基于ORCHIDEE模型估算了青藏高原的NPP时空动态。三江源作为青藏高原的重要组成部分,以上研究能够为三江源地区植被NPP估算提供方法上的参考与借鉴,但一般无法从中获取三江源区具体的NPP大小和详细的NPP变化特征。

2.2.4 遥感—过程耦合模型 遥感—过程耦合模型整合了过程模型和遥感参数模型的优点,已逐步发展成为当前植被NPP研究的重要手段^[51-52]。模型耦合方式一般有两种:①在遥感参数模型的基础上加入一些简化的生理生态过程,以增强模型的机理性;②在已有过程模型的基础上加入遥感的手段或算法,以解决过程模型在参数获取、误差估计以及时空尺度转换等方面的难题。

王军邦等^[53]基于第一种耦合方式将GLOPEM模型和CEVSA模型进行耦合得到了GLOPEM-CEVSA模型,并利用此模型估算了三江源地区植被NPP的时空分布;MODIS NPP产品同样是基于遥感—过程耦合模型(MOD17A3算法)估算得到的,郭晓寅等^[54]和张继平等^[55]分别利用该产品数据对三江源地区植被NPP的时空变化格局进行了分析研究。第二种耦合方式的典型代表是BEPS模型,它在FOREST-BGC模型的基础上融入遥感LAI来实现叶片尺度到冠层尺度的空间转换,并引入集聚指数和太阳天顶角等进一步考虑冠层结构和入射条件等的变化对辐射传输的影响^[56],BEPS模型虽然目前还未被应用到三江源地区,但已在藏北地区验证了其适用性和可靠性^[57]。

3 估算结果

三江源地区已有研究一般是基于生态系统类型(或植被类型)逐像元对NPP进行模拟,并给出区域平均NPP的具体估算结果(表1,表2)。从中可以看出,不同研究模拟得到的平均NPP差异较大。对于三江源全区所有植被,采用模型模拟获得的平均NPP为 $258.99 \pm 172.95 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,其中最高值为郭佩佩等^[24]利用Thornthwaite Memorial模型估计的 $570.35 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,最低值为王军邦等^[53]采用GLOPEM-CEVSA模型估算的 $143.17 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,前者约为后者的4.0倍。对于三江源内分布最为广泛的草地植被(占研究区总面积达68%),模拟得到的其平均NPP为 $202.65 \pm 129.96 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,最高值为李惠梅等^[25]基于Thornthwaite Memorial模型估计的 $481.44 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,最低值为王翀^[29]利用CASA模型估算的 $61.42 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,前者约为后者的7.8倍。

从不同模型模拟的结果来看(图2),对于三江源全区,气候模型估算的平均NPP最高,所有植被的平均NPP约为 $453.23 \pm 252.30 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,草地平均NPP约为 $283.28 \pm 170.44 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$;其次为遥感模型,其估算的所有植被平均NPP约为 $165.61 \pm 69.42 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,草地平均NPP约为 $147.68 \pm 98.08 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$;遥感—过程耦合模型的估值最低,所有植被平均NPP约为 $143.17 \pm 100.53 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,草地平均NPP约为 $113.89 \pm 65.57 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 。

气候模型模拟的NPP一般被认为是潜在NPP,而其他模型估算的NPP通常被称为现实NPP,因此可以认为,三江源地区所有植被的潜在NPP约为 $453.23 \pm 252.30 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,现实NPP约为 $161.87 \pm 63.40 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$;草地的潜在NPP约为 $283.28 \pm 170.44 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$,现

表1 不同研究得出的三江源全区平均NPP估算结果

Tab. 1 Estimated mean NPP of the Three-River Headwater Region in different studies					
研究范围	植被类型	模型方法	研究时段	平均NPP(gC/m ² /yr)	参考文献
三江源全区	草地	气候模型(Thornthwaite Memorial)	2002-2010年	481.44	李惠梅等 ^[25]
三江源全区	草地	气候模型(气候生产潜力模型)	1971-2003年	225.00	李惠梅 ^[27]
三江源全区	草地	气候模型(Miami模型)	2005-2006年	211.92	王翀 ^[29]
三江源全区	草地	气候模型(CIM模型)	2005-2006年	214.75	王翀 ^[29]
三江源全区	草地	遥感模型(CASA模型)	2005-2006年	61.42	王翀 ^[29]
三江源全区	草地	遥感—过程耦合模型(MOD17A3算法)	2005-2006年	93.98	王翀 ^[29]
三江源全区	草地	遥感—过程耦合模型(MOD17A3算法)	2000-2010年	86.80	张继平等 ^[55]
三江源全区	全部植被	气候模型(Thornthwaite Memorial)	1960-2011年	570.35	郭佩佩等 ^[24]
三江源全区	全部植被	气候模型(Miami模型)	2004-2008年	486.90	蔡雨恋等 ^[38]
三江源全区	全部植被	气候模型(周广胜模型)	2004-2008年	302.45	蔡雨恋等 ^[38]
三江源全区	全部植被	遥感模型(CASA模型)	2001-2010年	169.02	张颖等 ^[36]
三江源全区	全部植被	遥感模型(CASA模型)	2004-2008年	168.68	蔡雨恋等 ^[38]
三江源全区	全部植被	遥感模型(CASA模型)	2010年	146.66	沃笑等 ^[39]
三江源全区	全部植被	遥感模型(CASA模型)	2003年、2008年、2013年	148.82	陈利军 ^[40]
三江源全区	全部植被	遥感模型(GLOPEM模型)	1988-2004年	194.85	邵全琴等 ^[14]
三江源全区	全部植被	遥感—过程耦合模型(GLOPEM-CEVSA模型)	1988-2004年	143.17	王军邦等 ^[53]

表2 三江源全区不同植被类型平均NPP估算结果

植被类型	平均NPP(gC/m ² /yr)				
	邵全琴等 ^[14]	蔡雨恋等 ^[38]	沃笑等 ^[39]	王军邦等 ^[53]	郭晓寅等 ^[54]
草地	218.74	/	162.87	160.90	/
高寒草原	/	129.41	/	/	79.34
高寒草甸	/	188.95	/	/	89.38
森林	405.20	/	279.81	267.90	/
灌丛	156.04	/	/	/	/
农田	289.22	/	256.28	222.94	/
荒漠	21.48	/	62.81	36.13	/
湿地	127.09	/	/	161.36	/

实NPP约为130.79±73.27 gC/m²/yr。

针对不同植被类型，NPP估值总体上表现为森林>农田>草地>荒漠（表2）。具体而言，森林的平均NPP约为317.64±170.06 gC/m²/yr，农田约为256.15±130.41 gC/m²/yr，草地约为130.79±73.27 gC/m²/yr，荒漠约为40.14±25.99 gC/m²/yr。在草地植被中，高寒草甸的NPP估值一般大于高寒草原^[38, 54]，通过野外测量获得的实测NPP也反映出如此规律（表3），高寒草甸NPP通常是高寒草原NPP的1~3倍。

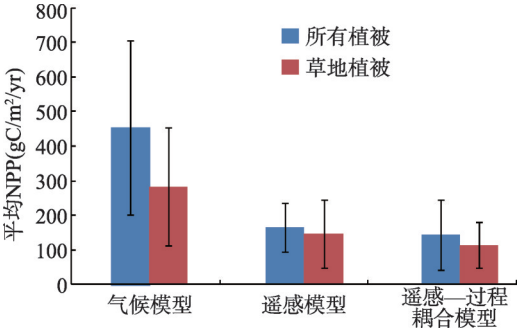


图2 不同模型估算的三江源全区平均NPP结果对比
Fig. 2 Comparison of estimated NPP based on different models in the Three-River Headwater Region

表3 三江源内不同地点草地NPP实测结果

Tab. 3 Measured grassland NPP at different sites within the Three-River Headwater Region

研究地点	纬度	经度	高程(m)	植被类型	研究时段	NPP(gC/m ² /yr)	数据来源
称多县珍秦镇	33°24'30"N	97°18'00"E	4250	高寒草甸	2010、2011	118.41	范月君 ^{[15]*}
治多县五道梁地区	35°12'56"N	93°04'05"E	4626	高寒草原	2000	53.55	Luo 等 ^{[16]*}
唐古拉山乡沱沱河镇	34°18'51"N	92°32'52"E	4582	高寒草原	2000	69.30	Luo 等 ^{[16]*}
玛沁县大武镇	34°23'24"N	100°16'33"E	3980	高寒草甸	2014	139.07	课题组自测
玛多县城附近	34°54'40"N	98°11'13"E	4207	高寒草原	2015	113.23	课题组自测

注: 范月君^[15]给出的NPP单位是gDM/m²/yr, Luo 等^[16]给出的NPP单位为tDM/ha/yr, 这里将干物质C含量取为常用值0.45进行换算, 以使研究结果间具有可比性。

4 估算方法与结果评价

4.1 估算方法

4.1.1 野外测量法 野外测量法的结果一般被认为是准确的, 学者们常以此作为对其他估算方法的检验依据。不过在实操过程中, 野外测量法存在很多不确定因素, 如样点选择 (是否经过人类利用)、采样内容 (是否包括立枯物与凋落物) 以及NPP换算方法 (以干重计还是以C计, 含C量多少) 等不同均会使结果产生差异。此外, 由于目前NPP野外测量主要基于生物量测定, 大多数野外测量法获得的NPP仅包含植物新生产的生物量, 与真实NPP仍然有所出入。因此, 明确与统一NPP的实测方法与采样标准是当前亟需解决的问题^[58]。

4.1.2 气候模型模拟法 气候模型一般不考虑地形、土壤条件、营养元素可利用性、人类活动等因子的影响, 且缺乏严密的生理生态机制, 因此模型估算精度较低, 通常较现实NPP偏大。根据三江源地区已有NPP估算结果 (表1), 基于气候模型得到的潜在NPP是基于其他模型得到的现实NPP的2~4倍。造成这种差异的原因主要在于: ① Miami模型和Thornthwaite Memorial模型等气候相关模型本是通过气候条件与实测NPP进行统计回归建立的, 应用于具体地区模型参数可能需要调整, 但已有研究都是直接利用现有模型参数对三江源NPP进行估算, 且基本上不对估算结果加以验证 (因为一般认为气候模型估算的NPP是气候条件控制下的潜在NPP), 导致在三江源地区基于此类模型得到的NPP结果明显偏高^[24-25, 38]; ② 三江源地区是传统的畜牧业区, 人类对草地的利用、管理等措施突出, 食植动物采食对NPP的影响不可忽略, 致使潜在NPP与现实NPP的差异较大。气候模型尽管简单方便, 但由于估算精度低, 在实际应用中受到很大限制。

4.1.3 遥感模型模拟法 遥感统计模型能够在较小范围内准确地估算植被NPP, 但是该方法不具有普适性, 多利用采样点直接到像元的尺度转换算法, 且多使用单一的统计回归模型, 模拟结果严重依赖于实测NPP, 因此很难在大区域推广使用^[58]。

遥感参数模型在三江源地区的应用非常普遍, 估算精度也较高^[14], 但在三江源NPP模拟过程中仍存在较大的不确定性^[59], 主要表现为以下几个方面:

(1) NDVI作为遥感参数模型的重要输入变量, 其精度和准确性会对NPP估算带来很大影响。根据已有研究^[60-61], 在植被覆盖度较低的情况下, 受裸露土壤影响, NDVI很难准确反映植被的生长状态, 而三江源地区分布着大量积雪、冰川、裸露山石、稀疏植被等, 通过遥感NDVI模拟植被NPP存在一定的不确定性; 另外, 为克服云的影响, 目前对NDVI数据的处理一般采用最大值合成法, 据此得到的NDVI代表的是合成时段内植被生长的最佳状态而不是平均状态, 理论上会导致NPP被高估。

(2) 模型对低温环境的处理还需结合三江源实际情况进行考虑。如使用最多的 CASA 模型默认月平均气温低于 -10°C 时 NPP 为 0, 低于 0°C 时土壤含水量不发生变化并与上个月相等^[5], 然而三江源区大多数植物为多年生植物, 气温特别低时植物叶片凋落, 但地下根系仍然有一部分是存活的 (对于森林和灌丛, 其地上部分也没有全部死亡), 因此 GPP 应为 0, NPP 应为负值, 直接将 NPP 计算为 0 会导致 NPP 被高估 (就这点而言, GLOPEM 模型理论上比 CASA 模型更适合在三江源这样的低温环境下使用, 因为 GLOPEM 模型分别模拟了植被的 GPP 和自养呼吸, 而 CASA 模型是直接模拟 NPP); 另一方面, 影响土壤含水量变化的直接因素是土壤温度而不是气温, 即便土壤温度降至 0°C 以下, 土壤水发生冻结, 土壤含水量在开始时也会有明显下降, 然后才保持稳定, 而不是一直不变。

(3) 模型无法获得详细的 NPP 变化过程。由于模型使用的遥感数据记录的是瞬时状态的值, 限于遥感数据的时间分辨率, 仅能获取有限频次 NPP 的数值变化, 无法得到 NPP 变化的详细过程, 更无法识别 NPP 变化的驱动因素以及量化人类活动等的影响。如果在环境条件迅速变化的情况下 (雪灾、病虫害等), 模型的可靠性会有所降低。

虽然遥感模型存在以上问题, 但总体而言, 模型能够以较低的科研成本获得相对较好的模拟精度和运算效率, 适于以估计植被现存量及其变化速率为目标的相关工作。

4.1.4 过程模型模拟法 鉴于过程模型目前还没有在三江源地区应用, 本文只能通过对已有大量过程模型进行分析, 探讨其应用到三江源 NPP 估算中可能存在的问题, 主要包括:

(1) 模型的物候模拟模块在三江源地区的适用性还需深入验证。物候对草地植被的生长和 NPP 累积至关重要, 物候的准确模拟是三江源 NPP 精确估算的前提条件^[62], 但大部分物候模型都是针对小区域范围建立的, 并不一定适用于其他地区。当前多数过程模型 (如 Biome-BGC 模型、ORCHIDEE 模型、LPJ 模型等) 是基于物候—气候的经验或半经验关系来模拟植被物候, 且一般认为物候受温度和水分条件控制, 而水分条件常通过降水来体现^[63-64]。在三江源地区, 由于冻土的广泛分布, 生长季初期虽然降水很少, 但地表水分条件并不差, 基于 Biome-BGC 模型的模拟实验发现, 由于模型对降水的过多限制, 导致模拟的三江源植被生长季开始日期被明显推迟。

(2) 大多数已有过程模型无法从机理上模拟多年生落叶草本植物的生长、衰老和死亡过程。现有过程模型对于草本植物的组成刻画一般较为粗略, 且多年生植物的生长和死亡通常利用人为设定的经验常数一周转率来控制, 对于植物地上、地下部分衰老和死亡的时间差异不加以考虑。然而, 三江源地区草地优势种与建群种基本上是多年生落叶草本植物, 其地上部分每年凋落, 地下根系的世代周期为 2~4 年 (根据实测数据结合参考文献获得)^[18-19]。如果直接将已有过程模型用于三江源草地 NPP 模拟, 可能由于植物体的粗略定义造成无法正确模拟不同组分间的碳、氮、水循环过程, 并且由于地下根系并非每年全部死亡, 需要区分活根与死根并定义不同的周转率, 否则会影响植物根系生长和土壤呼吸过程的模拟。

(3) 模型对于水循环过程的模拟效果一般不太理想。三江源地区冻土分布较广, 活动层厚度季节变化很大, 土壤水分来源除降水以外, 地下冰融化与侧向径流也是重要的补给源, 但是目前绝大多数模型都没有考虑冻土的存在, 降水在土壤中的下渗深度一般取为定值, 土壤水分来源也仅考虑降水, 造成土壤产汇流与含水量模拟误差较大, 从而影响土壤蒸发、气孔导度、光合作用、蒸腾作用等过程的模拟。

(4) 已有过程模型对于人类活动的影响模拟多较为粗略。大多数模型通过一些简化的过程模块或控制参数来模拟人类活动的影响, 如 DLEM 模型、CENTURY 模型、Biome-BGC 模型等^[65-67], 模拟结果无法反映空间差异, 在实际生态系统管理、规划与决

策中的应用有限。

(5) 目前几乎没有模型考虑野生动物的作用。三江源作为国家级自然保护区, 野生动物区系复杂、种类繁多, 藏野驴、藏原羚、黄羊、岩羊等食草野生动物的数量庞大, 要想准确地模拟三江源地区的植被NPP, 野生动物的影响不容忽视。

过程模型的模拟精度不一定优于遥感模型^[58], 但由于其可以模拟植物的生理生态过程及其影响因子、反馈机制等, 在生态系统管理和预警分析方面具有更为重要的意义。

4.1.5 遥感—过程耦合模型模拟法 遥感—过程耦合模型在一定程度上弥补了遥感模型机理较为薄弱的缺陷, 同时也使参数获取和时空尺度转换相比过程模型更为便利。王军邦等^[53]提出的 GLOPEM-CEVSA 模型虽然不是从机理上模拟植物的光合作用, 但该模型从机理上模拟了生物量分配、呼吸消耗、植物各组分凋落和土壤有机碳分解等过程, 已在三江源地区进行了验证。MOD17A3 算法基于遥感光能利用率模拟获得 GPP, 然后从生态过程出发估算植被的自养呼吸, 两者相结合获得植被 NPP^[68], 虽然目前已有许多基于三江源 MODIS NPP 产品进行的分析研究^[29, 54-55], 但在三江源地区针对该产品或 MOD17A3 算法进行实地验证的相关报道还非常少。

对于物候模拟问题, 遥感—过程耦合模型提供了另一种解决思路, 如 SiB2 模型利用连续的遥感 NDVI 数据获取植被物候信息^[69], BEPS 模型利用每 8 天 LAI 数据反映植被的物候变化^[70]。与遥感模型类似, 遥感—过程耦合模型对于生态系统的预警分析能力较弱。

4.2 参数取值

NPP 估算方法中很多参数都具有明确的生态学意义, 但在实际估算过程中, 即使某一参数的取值偏离了其合理的取值范围, 通过调整其他参数也能使结果获得看似较好的精度, 这种情况下 NPP 估算完全变成了数学游戏, 很难对人们认识和理解生态系统的具体变化机制有所裨益, 因此, NPP 估算过程中采用合理、准确的参数取值对 NPP 模型发展和科学研究均具有重要意义。受篇幅限制, 本文仅讨论最大光能利用率、地下与地上生物量的比、活根生物量占地下总生物量的比、植物 C 含量和根系周转率等参数取值在三江源 NPP 估算研究中存在的主要问题。

4.2.1 最大光能利用率 由于遥感参数模型在三江源植被 NPP 估算中应用较广, 而最大光能利用率又是遥感参数模型中极其重要的参数, 因此最大光能利用率的取值对三江源 NPP 估算结果影响较大。Potter 等^[71]认为全球植被的最大光能利用率为 0.389 gC/MJ, 但诸多研究表明此数据并不适合中国植被^[72]; Running 等^[73]根据 Biome-BGC 模型模拟了全球不同植被类型的最大光能利用率; 王翀^[29]和吴红等^[37]根据其模拟的草地最大光能利用率 0.608 gC/MJ 模拟了三江源地区的植被 NPP; 朱文泉^[72]在全国尺度改进了中国不同植被类型的最大光能利用率, 得出草地植被和耕作植被的最大光能利用率为 0.542 gC/MJ, 森林植被的最大光能利用率为 0.389~0.985 gC/MJ (针叶林、阔叶林、混交林等不同), 灌丛植被的最大光能利用率约为 0.429 gC/MJ; 蔡雨恋等^[38]在模拟三江源植被 NPP 时直接引用了其结果。卫亚星等^[74]根据相关文献资料和 NPP 实测数据, 模拟出青海省森林植被的最大光能利用率为 0.649~0.908 gC/MJ, 灌丛植被最大光能利用率为 0.114~0.538 gC/MJ, 草地植被主要建群种的最大光能利用率为 0.115~0.326 gC/MJ。三江源地区海拔高、太阳辐射强烈, 但植物光合作用所能固定的能量很有限, 同一种植物在高原地区测定时, 其光合作用和量子效率均较平原地区低, 光能利用率也低^[18], 直接将用于全球或其他区域的植被最大光能利用率用于三江源地区可能会引起 NPP 的高估。因此, 在进行三江源植被 NPP 估算时, 草地植被的最大光能利用率取值范围建议采用 0.115~0.326 gC/MJ, 森林植被采用 0.389~0.908 gC/MJ, 灌丛植被采用 0.114~0.538 gC/MJ。

4.2.2 地下与地上生物量的比 野外实测NPP需要首先获取植被生物量，但由于地下部分生物量直接获取较为困难，因此大部分学者通过地下与地上生物量的比（即根冠比，R/S）来得到植被地下生物量，尤其对于草地植被，R/S的应用非常普及。本文针对三江源地区主要的草地类型，对已有关于R/S的部分研究成果进行了汇总（表4），可见不同研究得到或使用的R/S差异较大。尽管R/S具有一定的不确定性，大多数研究表明，对于高寒草甸和高寒草原，其地上生物量与地下生物量间的相关性较好，R/S处于一定的变动范围之内，因此利用R/S来估算三江源地区草地植被的生物量和生产力仍然是相对可靠的方法^[80]。根据Yang等^[76]野外获取的大量数据，可知高寒草甸的R/S变化范围大体位于0.8~13之间，高寒草原的R/S位于1.4~12.7之间，整个高寒草地的R/S中值约为5.8，大于全球草地的R/S中值4.5。

表4 三江源主要草地类型的R/S均值汇总

Tab. 4 R/S values of primary grassland types in the Three-River Headwater Region

高寒草甸	高寒草原	温性草原	沼泽湿地	参考文献	获取方式
4.15	/	/	/	范月君 ^[15]	野外实测
6.8	5.2	/	/	Yang等 ^[76]	野外实测
7.917	4.420	4.325	/	Luo等 ^[77]	野外实测
7.92	4.25	4.25	15.68	朴世龙等 ^[78]	文献总结
9.19	9.49	9.19	/	王妮等 ^[79]	文献总结
6.5	6.2	6.4	/	马安娜等 ^[80]	文献总结

4.2.3 活根生物量占地下总生物量的比 只有活根才与植被生产力有关，因此在估算地下NPP时需要区分活根和死根。野外测量NPP时活根和死根的区分具有较强的主观性，一般可根据根系的颜色、密度、形态等进行区分：白色根和棕色根一般为活根，黑色根为死根；将根放入水中，密度较大沉在水底的根一般为死根，漂浮在水面的根一般为活根；外表完整、形态光滑的根一般是活根，皮层脱落或表皮褶皱的根一般是死根。周兴民^[18]曾于1980-1982年5-9月连续对海北矮嵩草草甸的活根和死根生物量进行观测，发现其活根生物量约占地下总根生物量的70%~80%，樊江文等^[42]在计算三江源草地产草量时借鉴其研究结果并采用0.79作为活根与总根生物量的比值。然而，本文通过对三江源地区的一些实测数据（测于2005年、2008年和2015年）进行分析，发现大部分采样点的活根生物量占地下总根生物量的20%~40%，只有在某些沼泽化高寒草甸地区，该比例才达到60%以上。结果差异如此之大的原因目前还没有很好的解释，可能与活根、死根的区分方法有关，也可能是由于全球气候变化导致地温显著升高，土壤含水量下降，从而使地下根系的存活时间相比20世纪80年代大大缩短。

4.2.4 植物C含量 通过生物量推演植被NPP可能还需要乘以一个含C系数（NPP以C计时）。周兴民^[18]和赵新全^[19]的多年研究表明，高寒嵩草草甸的植物体C含量变动在34%~38%之间。常天军^[81]对紫花针茅高寒草原的研究显示，紫花针茅整体C含量为21%~39%（平均为29%）。郑帷捷等^[82]根据已发表的文献数据以及部分实测数据，得出乔木的含C量平均值为46.22%，灌木为45.93%，草本植物仅为37.13%；草本植物中，叶片含C量平均为36.83%，茎为32.57%，根为34.16%。以上研究得出的草本植物C含量均远低于45%~50%的常用取值范围，但实际上，目前绝大多数学者在进行三江源草地NPP估算时，直接将0.45作为植物含C系数^[15, 55]，这将导致以C计的NPP被高估。因此，对于高寒草甸和高寒草原等草本植物，其C含量取值不应超过40%；而对于森林和灌丛，其C含量可以采用45%~50%的常用取值范围。

4.2.5 根系周转率 根系周转率是指单位时间(通常是一年)内根系生长或死亡的量占根系总生物量的比例,其准确测定和估算较为困难。Gill等^[20]建议采用以下3种方式对全球草地的根系周转率进行估算:①利用地下NPP与地下(平均、最小或最大)生物量的比值进行计算;②采用与地上生产力或气候数据建立统计回归关系进行计算;③直接取为常数值。樊江文等^[42]在计算三江源草地产草量时,采用与地上NPP(实际上是地上生物量)的经验关系来估算根系周转率并进一步获取地下NPP,在湿地和沼泽化地区,其估算的根系周转率可达0.7以上。过程模型在模拟植被NPP时一般是将不同植被类型的根系周转率取为常数,Gill等^[20]也认为可以对全球草地的根系周转率取常数0.65。吴伊波等^[83]分别利用根钻法、内生长袋法和微根管法对青海省高寒草甸植被的根系生产力和周转率进行研究,发现不同方法计算得到的根系周转率差别较大,可靠的根系周转率结果大概在0.29~0.63之间。因此,在估算三江源草地NPP时,建议根系周转率取值在0.29~0.65之间,对于湿地和沼泽化高寒草甸,其根系周转率取值可以达到0.7^[18, 42]。

4.3 估算结果

4.3.1 模型精度 已有研究对不同NPP模型的估算精度进行了评估。蔡雨恋等^[38]将CASA模型模拟的生长季NPP与实测NPP进行相关分析,发现CASA模型的模拟结果是较为理想的,相关系数达0.8;此外,通过将CASA模型与Miami模型和周广胜模型的模拟结果进行对比,认为Miami模型和周广胜模型的模拟结果均偏高,相比之下CASA模型更适用于三江源地区。樊江文等^[42]和Fan等^[43]根据GLOPEM模型模拟的NPP结果计算产草量,并与相同地点的实测产草量进行对比分析,结果表明两者之间具有较好的相关性($R^2 = 0.54$, $P < 0.01$)。王军邦等^[53]将GLOPEM-CEVSA模型的模拟结果与草地调查实测产草量数据进行对比分析,认为GLOPEM-CEVSA模型模拟的多年平均产草量较观测的平均产草量偏低约13.7%。王翀^[29]基于实测NPP利用相关系数(R)、决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)等指标来比较不同模型对NPP的模拟效果,结果表明,MOD17A3算法对研究区NPP的模拟效果最好,其次是CASA模型,Miami模型和CIM模型的精度最低。根据已有评估结果大体来看,遥感—过程耦合模型的估算精度可能最高,其次为遥感模型,气候模型的估算精度最低。

4.3.2 验证方法 三江源地区已有NPP研究采用的验证方法主要有:①实地测量地上生物量或地面产草量,转换为NPP总量后与模型模拟结果进行对比分析^[29, 38];②将模型模拟的草地NPP转换为产草量后与地面实测产草量进行比较^[42-43, 53];③与其他相同或相似研究区域的前人研究结果进行比较来判断NPP模拟的合理性^[36, 40];④直接与MODIS MOD17A3产品进行比较^[39]。在NPP验证工作中以下两个问题应引起足够重视:①普遍缺少地下NPP实测数据,地下NPP是三江源草地植被NPP的主体,目前地下NPP的获取主要根据地上生物量(或地上NPP)转换获得,但不同研究使用的R/S、根系周转率、植物C含量等差异较大,会对实测NPP造成很大影响;②仅对模型输出的NPP进行验证,对模型的中间变量验证重视不够,如果只对NPP进行验证,估算模型在使用过程中实际上变成了“黑箱子”,模型应用变成了“调参游戏”,若仅模拟的NPP结果准确,中间变量误差很大,将给生态系统模拟和预警分析带来非常大的不确定性。

4.3.3 结果评估 根据Chapin III等^[84],NPP包括植物生产的新生物量、根分泌到土壤中的可溶性有机化合物、转移到与根有共生关系的微生物(如菌根和固氮细菌)中的碳、食植动物和死亡造成的损失以及由叶片向大气挥发排放的损失。目前大多数NPP的野外测定只包括新生产的植物生物量,而根据已有研究,仅根系分泌及向菌根转移的NPP就占NPP总量的20%以上^[84]。

三江源作为传统畜牧业区,根据多年的牧草检测,家畜的年采食量约占草地植被地上净第一性生产量的41.48%^[18]。野生动物对NPP的消耗也很大,据初步统计,2013年仅玛多县藏野驴、藏原羚、黄羊、岩羊、鹿等食草野生动物的数量约有20多万只,已远超过其牲畜的数量(约13万只左右),而一头藏野驴的采食量相当于6只羊的食草量^[18]。此外,草原啮齿类动物在部分地区泛滥成灾^[14],据保守估计,在啮齿动物密度处于中等水平的年份,啮齿动物对家畜可利用资源的消耗达20%~30%^[18]。因此,三江源地区地上和地下生物量在达到最大值之前,已有相当比例的现存量被食植动物采食,造成实际NPP被大大低估。

根据已有研究^[16, 18],假设高寒草地植被地上NPP与地下NPP的比值约为1:2,那么地上NPP约占总NPP的30%。如果考虑家畜啃食,其年采食量约占总NPP的12%;野生动物的采食量不会低于家畜啃食的比例,同样按12%计;啮齿类动物消耗的NPP按家畜消耗NPP的20%计,其对总NPP的消耗比例约2%;根系分泌及向菌根转移的NPP比例按20%计。因此,三江源地区大部分野外测量获得的NPP可能至少低估了实际NPP的40%。如果模型没有考虑或无法反映造成NPP低估的这些因素,直接将被低估的NPP用于实际NPP的模拟过程(主要是模型参数率定和模拟结果检验),那么得到的NPP结果同样会被低估。因此,在NPP模拟过程中必须保证模拟的NPP与使用的实测NPP的含义相一致。

5 结论

(1) 植被NPP估算方法大致可分为野外测量法和模型模拟法,其中,NPP估算模型主要有4类:气候模型、遥感模型、过程模型和遥感—过程耦合模型。

(2) 三江源所有植被的潜在NPP约为 453.23 ± 252.30 gC/m²/yr,现实NPP约为 161.87 ± 63.40 gC/m²/yr;草地的潜在NPP约为 283.28 ± 170.44 gC/m²/yr,现实NPP约为 130.79 ± 73.27 gC/m²/yr。从不同模型估算结果来看,气候模型估算的NPP最高,其次是遥感模型,遥感—过程耦合模型的估值最低。就不同植被类型而言,NPP大小总体上表现为森林>农田>草地>荒漠。

(3) 不同NPP估算方法中,野外测量法的结果一般被认为是真值,常作为对其他估算方法的检验数据;气候模型估算的潜在NPP与现实NPP差异较大,前者约为后者的2~4倍;遥感参数模型在三江源地区的应用非常普遍,估算精度也较高,但在NPP模拟中仍存在较大的不确定性;由于三江源的特殊性,目前大多数过程模型不能直接用于三江源区的NPP估算,其中物候模拟、多年生落叶草本植物的生态机理研究、冻土区水文过程建模、人类活动和野生动物的影响评价是研究的难点;遥感—过程耦合模型在一定程度上弥补了遥感模型和过程模型各自的缺陷,但模型的预警分析能力较弱。

(4) 合理、准确的参数取值对NPP估算至关重要,但目前多数研究可能过高地估计了三江源地区的草地植被最大光能利用率;采用的地下与地上生物量的比(R/S)存在较大差异;活根生物量占地下总根生物量的取值偏高,目前实测获得的比例约为20%~40%;植物体含C量的取值也偏高,草本植物含C量远低于45%~50%的常用取值范围;根系周转率的准确测定较为困难,可靠的根系周转率取值范围为0.29~0.65,在湿地和沼泽化高寒草甸地区,植被根系周转率可达0.7。

(5) 总体来说,NPP模型中遥感—过程耦合模型的估算精度可能最高,其次是遥感模型,气候模型的估算精度最低;目前三江源地区相关研究对于NPP的验证还不够全

面,需要在验证方式与内容上继续深入;大部分NPP野外测量获得的NPP可能至少低估了三江源实际NPP的40%,如果直接将其用于实际NPP的模拟过程,得到的NPP结果同样会被低估,因此必须保证模型模拟的NPP与使用的实测NPP的含义相一致。

6 展望

(1) 加强数据基础设施建设。数据是科学研究的基础,由于三江源自然环境特殊,准确、详细的基础数据还较为缺乏,如地下生物量和NPP的野外测量数据有限,生态定位研究站和通量观测塔数量较少且分布不均,可用的植被类型数据、土壤数据以及冻土分布数据等分辨率较粗且现势性差,这些都远远满足不了当前的科研需求。近年来,三江源生态保护与建设工程投入大量资金和科技力量建设了一批地面生态监测站点,并与空间遥感技术相结合形成了一体化的综合监测体系。以工程设置的短期定位观测站为基础,构建完整、系统的生态系统地面长期监测体系并建立稳定运行机制,以实现三江源重要基础数据的测量、积累和共享。

(2) 重视机理模型研究。目前,三江源地区开展的已有研究多使用气候模型和遥感模型,这些非机理模型无法解释和预测NPP的变化过程,不能为决策者应对未来全球变化提供直接依据。鉴于当前还没有专门在三江源地区应用机理模型报道,未来需在大量模拟实验的基础上详细检验NPP过程模型在三江源地区的适用性,或针对三江源特殊的高寒生态环境建立专门的机理模型。精准物候模拟、多年生落叶草的生长和死亡机理、高寒区冻土及其相关的特殊生态水文过程等都是三江源机理模型研究的难点。此外,鉴于三江源空间范围广,生态系统空间分异明显,在进行NPP模拟时三江源内部的区域差异需给予足够重视。

(3) 发展耦合人类活动与野生动物活动的模拟模型。在NPP估算模型中,气候模型无法考虑各种扰动因子对NPP的影响;遥感模型可以通过植被指数间接地反映人类和野生动物的作用,但无法体现具体过程且不能量化影响程度;过程模型以及遥感—过程耦合模型虽有能力描述人类活动与野生动物活动对NPP的影响,但目前大多数模型对于人类活动的模拟较多,对野生动物的影响基本没考虑。随着三江源自然保护区野生动物数量越来越庞大,耦合人类活动与野生动物活动的NPP模型是未来模型发展的必然趋势。

(4) 研发区域尺度模型运行平台。目前NPP的估算方法虽然很多,但在实际应用时由于模型原理和计算的复杂性以及数据准备的繁琐,相关领域的科学研究人员以及业务部门人员在模型应用时会面临较大的困难,这大大限制了NPP研究实际应用的广度和深度,因此,区域尺度NPP模型运行平台的研发需给予足够重视。

(5) 与环境管理相衔接。NPP不但反映了植被的生长状况,而且是生态系统健康评价的重要指标,其高低不仅直接影响到生态系统本身的过程和功能,对生态系统的供给服务功能和调节服务功能也会产生深刻的影响,最终影响人类的福祉。因此,加强NPP研究成果在生态资产评估、生态审计、生态风险评估、生态保护对策模拟与分析等环境管理领域的应用,对推进三江源地区NPP研究工作具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Running S W. A measurable planetary boundary for the biosphere. *Science*, 2012, 337(6101): 1458-1459.
- [2] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystem. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332.
- [3] Lieth H, Whittaker R H. Primary Production of the Biosphere. New York: Springer-Verlag Press, 1975: 1-10.
- [4] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs.

- Remote Sensing of Environment, 1997, 62(2): 158-175.
- [5] Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. Global Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 82-89, 100-102. [周广胜, 王玉辉. 全球生态学. 北京: 气象出版社, 2003: 82-89, 100-102.]
- [6] Zhang Xianzhou. Estimation and distribution of net primary productivity of natural vegetation in China. Natural Resources, 1992(1): 15-21. [张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. 自然资源, 1992(1): 15-21.]
- [7] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. A natural vegetation NPP model. Acta Phytocologica Sinica, 1995, 19(3): 193-200. [周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.]
- [8] Fang Jingyun, Tang Yanhong, Lin Junda, et al. Global Ecology: Climate Change and Ecological Responses. Beijing: Higher Education Press; Heidelberg: Springer Press, 2000: 191. [方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社; 海德堡: 施普林格出版社, 2000: 191.]
- [9] Qin Dahe. Ecological Protection and Sustainable Development in the Three-River Headwater Region. Beijing: Science Press, 2014: 1-5. [秦大河. 三江源区生态保护与可持续发展. 北京: 科学出版社, 2014: 1-5.]
- [10] Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 897-908. [刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 897-908.]
- [11] Tang Hongyu, Xiao Fengjin, Zhang Qiang, et al. Vegetation change and its response to climate change in Three-River Source Region. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(4): 177-180. [唐红玉, 肖凤劲, 张强, 等. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 177-180.]
- [12] Li Lin, Zhu Xide, Zhou Lusheng, et al. Climatic changes over headwater of the Three-River-Area and its effect on ecological environment. Meteorological Monthly, 2004, 30(8): 18-21. [李林, 朱西德, 周陆生, 等. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. 气象, 2004, 30(8): 18-21.]
- [13] Shao Quanqin, Zhao Zhiping, Liu Jiyan, et al. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years. Geographical Research, 2010, 29(8): 1439-1451. [邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.]
- [14] Shao Quanqin, Fan Jiangwen, et al. Integrated monitoring and evaluation of ecosystems in the Three-River Headwater Region. Beijing: Science Press, 2012: 15-29, 167-172, 479. [邵全琴, 樊江文, 等. 三江源区生态系统综合监测与评估. 北京: 科学出版社, 2012: 15-29, 167-172, 479.]
- [15] Fan Yuejun. Effects of fencing and grazing on plant morphology, community characteristics and carbon balance of kobresia pygmaea meadow in the Three Headwater Regions [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2003. [范月君. 围栏与放牧对三江源区高山嵩草草甸植物形态、群落特征及碳平衡的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2003.]
- [16] Luo T X, Pan Y, Ouyang H, et al. Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13(4): 345-358.
- [17] Xu Haihong. Effects of different grazing systems on carbon balance in stipa breviflora desert steppe [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. [徐海红. 不同放牧制度对短花针茅荒漠草原碳平衡的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.]
- [18] Zhou Xingmin. Chinese Kobresia Meadow. Beijing: Science Press, 2001: 132-133, 146-195. [周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001: 132-133, 146-195.]
- [19] Zhao Xinquan. Alpine Meadow Ecosystem and Global Change. Beijing: Science Press, 2009: 169, 219-221. [赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社, 2009: 169, 219-221.]
- [20] Gill R A, Kelly R H, Parton W J, et al. Using simple environmental variables to estimate belowground productivity in grasslands. Global Ecology & Biogeography, 2002, 11(1): 79-86.
- [21] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [22] Cramer W, Field C B. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Introduction. Global Change Biology, 1999, 5(S1): iii-iv.
- [23] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. Global Change Biology, 1999, 5(S1): 1-15.
- [24] Guo Peipei, Yang Dong, Wang Hui, et al. Climate change and its effects on climatic productivity in the Three-River Headwaters Region in 1960-2011. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(10): 2806-2814. [郭佩佩, 杨东, 王慧, 等. 1960-2011 年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2806-2814.]

- [25] Li Huimei, Zhang Anlu. Response of grassland climate productivity to climate change in Sanjiangyuan Regions. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2014(1): 124-130. [李惠梅, 张安录. 三江源草地气候生产力对气候变化的响应. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2014(1): 124-130.]
- [26] Guo Lianyun, Wu Rang, Wang Qingchun, et al. Influence of climate change on grassland productivity in Xinghai County in the source regions of Yangtze River. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(2): 5-10. [郭连云, 吴让, 汪青春, 等. 气候变化对三江源兴海县草地气候生产潜力的影响. *中国草地学报*, 2008, 30(2): 5-10.]
- [27] Li Huimei. Assessment of climate productivity of natural grassland in the Three Rivers Source Regions in Qinghai. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(12): 6414-6416, 6460. [李惠梅. 三江源地区天然牧草气候生产力评估. *安徽农业科学*, 2010, 38(12): 6414-6416, 6460.]
- [28] Lin H L. A new model of grassland net primary productivity (NPP) based on the integrated orderly classification system of grassland. *The Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2009: 52-56.
- [29] Wang Chong. Study on simulation methods of alpine grassland net primary productivity in Three Rivers Source Region of Tibetan Plateau, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. [王翀. 三江源区高寒草地净初级生产力模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.]
- [30] Chen Jinfa, Liu Chang, Xu Jianbo. Research on the remote sensing monitoring of grass productivity based on TM-NDVI. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(12): 7365-7366, 7407. [陈进发, 刘畅, 徐剑波. 基于TM-NDVI的草地生产力遥感监测研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(12): 7365-7366, 7407.]
- [31] Ma Xuanlong. The monitoring of rangeland resources productivity of Qinghai Province based on 3S technologies [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. [马轩龙. 基于3S技术对青海省草地资源生产力的监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.]
- [32] Hanbo. Modeling aboveground biomass of alpine grassland in the Three-River Headwaters Region based on remote sensing data [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015. [韩波. 三江源区高寒草地地上生物量遥感反演模型的建立[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.]
- [33] Du Yue, Liu Baokang, Guo Zhenggang. Changes of forage biomass of grasslands during the growing season in the Qinghai-Tibetan Plateau based on MODIS data. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 1117-1123. [杜玉娥, 刘宝康, 郭正刚. 基于MODIS的青藏高原牧草生长季草地生物量动态. *草业科学*, 2011, 28(6): 1117-1123.]
- [34] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9: 747-766.
- [35] Kumar M, Monteith J L. Remote sensing of crop growth/Plants and the Daylight Spectrum. London: Academic Press, 1981: 133-144.
- [36] Zhang Ying, Chen Huaiyan, Li Jianlong. Quantitative estimation for net primary productivity of Three-Rivers Source Ecosystem in recent 10 years. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2014, 20(10): 25-28. [张颖, 陈怀艳, 李建龙. 三江源生态系统近10年净初级生产力估测. *天津农业科学*, 2014, 20(10): 25-28.]
- [37] Wu Hong, An Ru, Li Xiaoxue, et al. Remote sensing monitoring of grassland degradation based on NPP change in the Mado County of the sources region of Yellow River. *Pratacultural Science*, 2011, 28(4): 536-542. [吴红, 安如, 李晓雪, 等. 基于净初级生产力变化的草地退化监测研究. *草业科学*, 2011, 28(4): 536-542.]
- [38] Cai Yulian, Zheng Youfei, Wang Yunlong, et al. Analysis of terrestrial net primary productivity by improved CASA model in Three-River Headwaters Region. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 5(1): 34-42. [蔡雨恋, 郑有飞, 王云龙, 等. 利用改进的CASA模型分析三江源区净植被生产力. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 5(1): 34-42.]
- [39] Wo Xiao, Wu Liangcai, Zhang Jiping, et al. Estimation of net primary production in the Three-River Headwater Region using CASA model. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(9): 45-50. [沃笑, 吴良才, 张继平, 等. 基于CASA模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 45-50.]
- [40] Chen Lijun. The study on the temporal and spatial variation of NPP and its driving factors in Sanjiangyuan Nature Reserve [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015. [陈利军. 三江源自然保护区NPP的时空变化及驱动因子研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015.]
- [41] Xiao Tong, Liu Jiyan, Shao Quanqin. A simulation on changes in vegetation productivity in "Three River Sources" Nature Reserve, Qinghai Province over past 20 years. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(5): 557-565. [肖桐, 刘纪远, 邵全琴. 近20年青海三江源自然保护区植被生产力变化模拟. *地球信息科学学报*, 2009, 11(5): 557-565.]
- [42] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Dynamic changes of grassland yield in Three River Headwater Region from 1988 to 2005. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1): 5-10. [樊江文, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1988-2005年三江源草地产草量变化动态分析. *草地学报*, 2010, 18(1): 5-10.]

- [43] Fan J W, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1): 571-584.
- [44] Zhou Caiping, Ouyang Hua, Wang Qinxue, et al. Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 74-79. [周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. *地理学报*, 2004, 59(1): 74-79.]
- [45] 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. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 649-662.
- [46] Yan L, Zhou G S, Wang Y H, et al. The spatial and temporal dynamics of carbon budget in the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau using the terrestrial ecosystem model. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107(16): 195-201.
- [47] Zhang Y Q, Tang Y H, Jiang J, et al. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(1): 113-120.
- [48] Ye Jiansheng. Response of vegetation net primary productivity to climate change on the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. [叶建圣. 青藏高原植被净初级生产力对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.]
- [49] Qi Weiwei, Niu Haishan, Wang Shiping, et al. Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1713-1722. [齐伟伟, 牛海山, 汪诗平, 等. 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究. *生态学报*, 2012, 32(6): 1713-1722.]
- [50] Piao S, Tan K, Nan H, et al. Impacts of climate and CO₂ changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades. *Global and Planetary Change*, 2012, 98/99: 73-80.
- [51] Feng Xianfeng, Liu Gaochuan, Chen Shupeng, et al. Study on process model of net primary productivity of terrestrial ecosystems. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 369-378. [冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 369-378.]
- [52] Feng Xianfeng, Sun Qingling, Lin Bin. NPP process models applied in regional and global scales and responses of NPP to the global change. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 496-503. [冯险峰, 孙庆龄, 林斌. 区域及全球尺度的NPP过程模型和NPP对全球变化的响应. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 496-503.]
- [53] Wang Junbang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988-2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the "Three-River Headwaters" region of Qinghai Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254-269. [王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感-过程耦合模型的1988-2004年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.]
- [54] Guo Xiaoyin, He Yong, Shen Yongping, et al. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow rivers from 2000 to 2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 512-518. [郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等. 基于MODIS资料的2000-2004年江河源区陆地植被净初级生产力分析. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 512-518.]
- [55] Zhang Jiping, Liu Chunlan, Hao Haiguang, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters Region based on MODIS GPP/NPP data. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 8-13. [张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 8-13.]
- [56] Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2-3): 99-119.
- [57] Zheng Lingyun. Study on dynamic change of NPP and grassland change in Northern Tibet based on remote sensing and biological processes model BEPS [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2006. [郑凌云. 基于卫星遥感与BEPS生态模式的藏北草地变化及NPP动态研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006.]
- [58] Gao Tian, Xu Bin, Yang Xiuchun, et al. Review of researches on biomass carbon stock in grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1724-1731. [高添, 徐斌, 杨秀春, 等. 青藏高原草地生态系统生物量碳库研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1724-1731.]
- [59] Zhang Meiling, Jiang Wenlan, Chen Quangong, et al. Research progress in the estimation models of grassland net primary productivity. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(2): 356-366. [张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 等. 草地净第一性生产力估算模型研究进展. *草地学报*, 2011, 19(2): 356-366.]
- [60] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *PNAS*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [61] Yang Yuanhe, Piao Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan

- Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8. [杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植被生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.]
- [62] Hidy D, Barcza Z, Haszpra L, et al. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling*, 2012, 226: 99-119.
- [63] Tian Dongxiao, Zeng Xiaodong. Research progress in dynamic vegetation model phenology schemes. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(6): 726-734. [田东晓, 曾晓东. 植被动力学模式中物候方案的研究进展. *气候与环境研究*, 2015, 20(6): 726-734.]
- [64] Jolly W M, Nemani R R, Running S W, et al. A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology*, 2005, 11: 619-632.
- [65] Tian Hanqin, Liu Mingliang, Zhang Chi, et al. The dynamic land ecosystem model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1027-1047. [田汉勤, 刘明亮, 张弛, 等. 全球变化与陆地系统综合集成模拟: 新一代陆地生态系统动态模型(DLEM). *地理学报*, 2010, 65(9): 1027-1047.]
- [66] Zhang Qianyu, Li Ping, Zong Yuzheng, et al. Research and application of CENTURY model in different ecological systems. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(11): 1563-1566. [张仟雨, 李萍, 宗毓铮, 等. CENTURY模型在不同生态系统中的研究与应用. *山西农业科学*, 2015, 43(11): 1563-1566.]
- [67] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, 4(3): 1-85.
- [68] Running S W, Zhao M S. *Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products User's Guide (version 3.0)*. Missoula, USA: The University of Montana, 2015.
- [69] Sellers P J, Tucker C J. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 706-737.
- [70] Sun Qingling, Feng Xianfeng, Liu Mengxiao, et al. Estimation and analysis of net primary productivity in Wuling mountainous area based on remote sensing. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1628-1640. [孙庆龄, 冯险峰, 刘梦晓, 等. 武陵山区植被净初级生产力遥感模拟与分析. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1628-1640.]
- [71] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7: 811-841.
- [72] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, He Hao, et al. Simulation of maximum light use efficiency of typical vegetation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 700-706. [朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.]
- [73] Running S W, Thornton P E, Nemani R. *Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system*/Sala O, Jackson R, Mooney H. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer Verlag, 2000: 44-57.
- [74] Wei Yaxing, Wang Liwen. The study on simulating light use efficiency of vegetation in Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5209-5216. [卫亚星, 王莉雯. 青海省植被光能利用率模拟研究. *生态学报*, 2010, 30(19): 5209-5216.]
- [75] Fan J W, Zhong H P, Harris W, et al. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [76] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(1): 177-184.
- [77] Luo T X, Li W H, Zhu H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 2002, 12(4): 980-997.
- [78] Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 491-498. [朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.]
- [79] Wang Wei, Peng Shushi, Fang Jingyun. Biomass distribution of natural grasslands and its response to climate change in North China. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1): 91-97. [王妮, 彭书时, 方精云. 中国北方天然草地的生物量分配及其对气候的响应. *干旱区研究*, 2008, 25(1): 91-97.]
- [80] Ma Anna, Yu Guirui, He Nianpeng, et al. Above- and below- ground biomass relationships in China's grassland vegetation. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 769-776. [马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 769-776.]
- [81] Chang Tianjun. The distribution pattern of carbon reserve in northern Tibet alpine grassland ecosystem [D]. Linzhi:

- Agriculture and Animal Husbandry College of Tibet University, 2008. [常天军. 藏北高寒草原植被和土壤碳空间分布格局[D]. 林芝: 西藏大学农牧学院, 2008.]
- [82] Zheng Weijie, Bao Weikai, Gu Bin, et al. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(3): 307-313. [郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 307-313.]
- [83] Wu Yibo, Che Rongxiao, Ma Shuang, et al. Estimation of root production and turnover in an alpine meadow: Comparison of three measurement methods. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3529-3537. [吴伊波, 车荣晓, 马双, 等. 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究. *生态学报*, 2014, 34(13): 3529-3537.]
- [84] Chapin III F S, Matson P A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2002: 127-128.
- [85] Song Fuli. Challenges for the Three-River Headwater Region. *The Economic Observer*, 2013-01-14. [宋馥李. 三江源的挑战. *经济观察报*, 2013-01-14.]

Review on the estimation of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwater Region, China

SUN Qingling^{1,2}, LI Baolin^{1,2,4}, LI Fei³, ZHANG Zhijun³, DING Lingling³,
ZHANG Tao^{1,2}, XU Lili^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Remote Sensing Monitoring Center of Qinghai Ecology and Environment, Xining 810007, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: As the "Water Tower of China", the Three-River Headwater Region (TRHR) is an important ecological shelter for national security and regional sustainable development for many Southeast Asian countries and the middle or lower reaches of main rivers in China. The TRHR has typical high and cold environment and alpine vegetation system. Net primary productivity (NPP), as a key vegetation parameter and ecological indicator, can reflect the natural environment change and the carbon budget level intuitively. Given the particular geographic environment and strategic position of the TRHR, many scholars have estimated NPP of the TRHR using different methods. For various reasons, however, the estimated NPP varies greatly. At present, a great deal of research involving NPP estimation has been conducted on the TRHR, but no paper has been published to summarize and assess these studies. Therefore, this paper (1) summarized systematically the related methods and results of NPP estimation in the TRHR by review of previous researches; (2) discussed the suitability of existing methods to the TRHR and pointed out the main problems; and (3) assessed the estimated NPP results. Finally, the development directions of NPP estimation in the TRHR were prospected.

Keywords: Three-River Headwater Region (TRHR); net primary productivity (NPP); estimation methods; NPP models; ecological parameters