

曾纳,任小丽,何洪林,等. 基于神经网络的三江源区草地地上生物量估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 59-66.

ZENG Na, REN Xiaoli, HE Honglin, et al. Aboveground biomass of grasslands in the Three-River Headwaters Region based on neural network[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1): 59-66.

## 基于神经网络的三江源区草地地上生物量估算

曾纳<sup>1,2</sup>, 任小丽<sup>1\*</sup>, 何洪林<sup>1,2</sup>, 张黎<sup>1,2</sup>, 李攀<sup>2,3</sup>, 李志强<sup>4</sup>, 张林波<sup>5</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002

4. 青海省生态环境遥感监测中心, 青海 西宁 810007

5. 中国环境科学研究院, 北京 100012

**摘要:** 三江源区位于青藏高原腹地, 作为长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地, 是我国重要的水源涵养和生态功能保护区. 为了及时准确地获取该区域草地生物量信息, 根据三江源区高寒草甸、高寒草原采样点的地上生物量实测值, 结合遥感植被指数、海拔、气象观测数据(光合有效辐射、年均气温、年降水量)构建 BP 神经网络模型, 估算 2001—2010 年三江源区的草地地上生物量, 并对其进行分类统计和年际变化分析. 结果表明: ①通过多次反复的训练与测验得到的 BP 神经网络模型, 对高寒草甸、高寒草原的地上生物量模拟值与实测值的  $R^2$  分别为 0.73、0.79, 表明 BP 神经网络模型具有较好的模拟效果. ②2001—2010 年三江源区草地地上生物量多年平均值为  $172.34 \text{ g/m}^2$ , 其中高寒草甸为  $214.81 \text{ g/m}^2$ , 高寒草原为  $130.07 \text{ g/m}^2$ . ③三江源区草地地上生物量的空间分布具有明显的空间异质性, 呈从东南向西北递减的趋势. 其中, 位于东部的河南县草地地上生物量最高, 为  $413.46 \text{ g/m}^2$ ; 而北部的曲麻莱最低, 仅为  $69.04 \text{ g/m}^2$ . ④2001—2010 年三江源区草地地上生物量呈缓慢波动上升趋势, 平均升幅为  $0.93 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{a)}$ . 研究显示, 利用站点地上生物量实测数据构建 BP 神经网络模型并对地上生物量进行模拟, 对于分析区域尺度的草地地上生物量分布格局和变化趋势行之有效.

**关键词:** 草地地上生物量; 三江源; BP 神经网络; 时空变化

**中图分类号:** X171.1      **文章编号:** 1001-6929(2017)01-0059-08

**文献标志码:** A      **DOI:** 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.06

## Aboveground Biomass of Grasslands in the Three-River Headwaters Region Based on Neural Network

ZENG Na<sup>1,2</sup>, REN Xiaoli<sup>1\*</sup>, HE Honglin<sup>1,2</sup>, ZHANG Li<sup>1,2</sup>, LI Pan<sup>2,3</sup>, LI Zhiqiang<sup>4</sup>, ZHANG Linbo<sup>5</sup>

1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

4. Qinghai Province Ecological Environment Remote Sensing Monitoring Center, Xining 810001, China

5. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** The Three-River Headwaters Region, located at the Qinghai-Tibet plateau, is the source of the Yangtze River, Yellow River and Lantsang River, and an important water source and ecological function conservation area. Grassland is the most widely distributed

**收稿日期:** 2016-07-15      **修订日期:** 2016-09-28

**基金项目:** 中国工程院重点咨询项目(2014-XZ-31); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014-YKY-003); 国家科技支撑计划项目(2015CB954102)

**作者简介:** 曾纳(1990-), 女, 湖南株洲人, ZengNa900110@163.com.

\* 责任作者, 任小丽(1984-), 女, 河北邢台人, 助理研究员, 博士, 主要从事碳循环模型数据融合研究, renxl@igsrr.ac.cn

ecosystem in the Three River Headwaters Region. Timely and accurate estimation of the grassland biomass is significant for protecting the grassland resources. Based on the aboveground biomass of alpine meadow and alpine steppe grasslands, the aboveground biomass model was constructed by training a BP neural network. Driven by remote sensing (EVI), elevation and meteorological data including photosynthetically active radiation, temperature and precipitation, the regional aboveground biomass

of grasslands during 2001-2010 was simulated by the model. The results showed that: (1) The BP neural network model performed well in the aboveground biomass estimation, with the correlation coefficient of determination between the predicted and measured aboveground biomass of alpine meadow and alpine steppe being 0.73 and 0.79, respectively. (2) The annual average aboveground biomass of grasslands during 2001-2010 in the Three River Headwaters Region was  $172.34 \text{ g/m}^2$ , with greater value ( $214.81 \text{ g/m}^2$ ) in alpine meadow than in alpine steppe ( $130.07 \text{ g/m}^2$ ). (3) The spatial pattern of grassland aboveground biomass in the Three River Headwaters Region was heterogeneous, lower in the northwest and higher in the southeast. The average grassland aboveground biomass of Henan county was the highest ( $413.46 \text{ g/m}^2$ ), and that of Qumalai County was the lowest ( $69.04 \text{ g/m}^2$ ). (4) There was a slightly increasing trend in grassland aboveground biomass from 2001 to 2010, with an increasing rate of  $0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . These results indicated that the BP neural network model we constructed in this paper could not only effectively simulate the grassland aboveground biomass, but also provided an approach for the analysis of the spatial-temporal variation in the regional scale grassland aboveground biomass.

**Keywords:** grassland aboveground biomass; Three-River Headwaters Region; BP neural network; spatial-temporal variation

三江源位于青海省南部,是长江、黄河和澜沧江的源头,同时也是重要的草地生态功能区,该区域的生态系统安全问题受到国内外研究人员的广泛关注<sup>[1-3]</sup>.草地作为三江源区分布最广的生态系统类型,一直是该区域生态研究的重点对象.生物量作为全球碳循环的重要组成部分,在全球碳平衡中起着重要作用<sup>[4-6]</sup>.及时准确地获取草地生物量信息,是科学合理设定载畜量和有效保护草地资源的基础,对于草地生态系统的可持续发展具有重大意义<sup>[7-8]</sup>.

传统的草地地上生物量(aboveground biomass)估算通常是利用直接收割法来获取采样点的实测生物量数据<sup>[9-11]</sup>.李晓东等<sup>[12]</sup>利用1997—2009年海北州海晏县的生物量实测资料,对典型高寒草地地上生物量进行了估算,其平均值为 $124.3 \text{ g/m}^2$ ,并呈波动增长趋势.但是通过直接收割法获取草地地上生物量对植被伤害较大,需要消耗大量人力、物力、财力,并且难以获取长时间序列的大面积数据,不适用于区域尺度的长时间段生物量的估算与分析.

遥感技术作为一种可以提供大范围空间数据的手段,自出现以来就得到了广泛关注.由于其具有覆盖范围广、时效性强、易获取等特点,越来越多的研究尝试借助遥感数据来估算大范围的草地地上生物量<sup>[13]</sup>.樊江文等<sup>[14]</sup>利用GLO-PEM模型计算了三江源区域的草地NPP,并通过各类草地植被地下部分生产力和地上部分生产力的比值对其产草量进行了估算.GLO-PEM模型所采用的数据主要包括基于卫星遥感的FPAR和年均气温及年降水量等气象数据.闫瑞瑞等<sup>[15]</sup>采用改进的CASA模型估算了2009年呼伦贝尔谢尔塔拉草甸草原生长季的牧草产草量,研究表明,模型估算的产草量与地面实测值无显著差异,并且其季节性变化与地面样方实测值的变化趋势基本一致.遥感参数模型一般以光能利用率为基础,通

过计算生态系统生产力来间接估算其生物量.另外,也有研究利用遥感影像与地面实测数据通过构建经验模型来直接估算植被生物量.如李素英等<sup>[16]</sup>基于TM数据计算了5种植被指数与同期内蒙古典型草原地上生物量的相关性,建立了5种植被指数与草地地上生物量的回归模型.然而回归拟合模型往往结构较为简单,容易出现伪回归,并且存在假设检验不过关等问题<sup>[17]</sup>.神经网络模型能学习和存贮大量的输入输出模式映射关系,而无需事前揭示这种映射关系的数学方程,在机器学习、模式识别、智能控制等多领域有广泛应用<sup>[20-21]</sup>.XIE等<sup>[18]</sup>利用内蒙古锡林郭勒568个草地地上生物量样本点的实测数据,对比了多元线性回归模型(multiple linear regression, MLR)与人工神经网络模型(artificial neural network, ANN)对该区域草地地上生物量的估算精度,结果表明,人工神经网络模型的模拟值较多元线性回归模型而言更接近实测值.琚存勇等<sup>[19]</sup>以鄂尔多斯地区草地地面调查样地为例,基于ETM+和DEM数据,建立了广义回归神经网络模型并估测了植被地上生物量,结果表明,神经网络模型估算植被地上生物量精度高且稳定性强.

该研究基于三江源区草地地上生物量实测值,结合同时段的气象和遥感数据,应用BP(back propagation)神经网络构建草地地上生物量估算模型,估算2001—2010年三江源区草地地上生物量,并进行分县统计和年际变化分析,以揭示该区域草地地上生物量的时空变化特征.

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概况

三江源区位于青海省南部,是我国长江、黄河、澜沧江的发源地.其西、西南与新疆维吾尔自治区和西藏自治区接壤,东、东南与甘肃省和四川省毗邻,地理

位置为 31°39'N ~ 37°10'N, 89°24'E ~ 102°27'E, 总面积达  $39.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占青海省总面积的 54.69%。三江源区地貌以山地为主, 海拔在 3 335 ~ 6 564 m 之间<sup>[22]</sup>; 为典型的高原大陆性气候, 年均气温 -5.6 ~ 3.8 °C, 年降水量 262.2 ~ 772.8 mm; 土壤以高山沼泽化草甸土为主<sup>[23]</sup>。

1.2 数据及来源

1.2.1 土地覆盖数据

采用的土地覆盖数据为吴炳方等<sup>[24]</sup>制作的中国区域 2010 年土地覆盖数据, 其以国产 HJ-1 卫星数据为基础, 针对中国生态环境评估和陆地生态系统碳收支估算的需求进行影像分类得到(见图 1)。其中, 草地类型包括高寒草甸(自然或半自然植被, 湿润指数 > 1.5, 土壤水饱和, 植被高度为 0.03 ~ 3 m, 植被覆盖度 > 20%) 和高寒草原(自然或半自然植被, 湿润指数为 0.9 ~ 1.5, 植被高度为 0.03 ~ 3 m, 植被覆盖度 > 20%)。草地覆盖总面积为  $28.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占三江源区总面积的 71.5%。

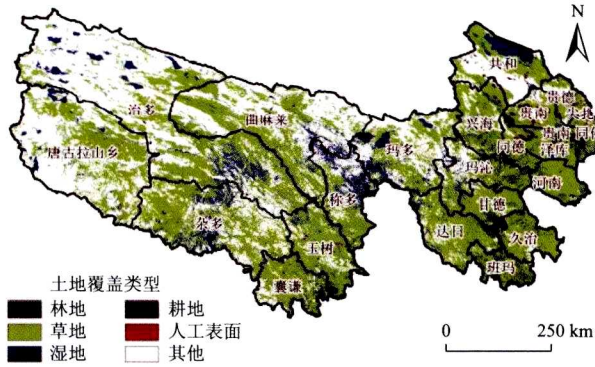


图 1 2010 年三江源区土地覆盖类型

Fig. 1 Land cover classification map of the Three-River Headwaters Region in 2010

1.2.2 地上生物量实测数据

草地上生物量采样时间为 2005—2007 年中每年草地生长最为旺盛的时段。样地大小为 30 m × 30 m, 每处样地设置 3 个样方(1 m × 1 m)。采样时将样方内草地上部分用剪刀齐地刈割, 去除黏附的土壤砾石等杂物, 带回实验室在 85 °C 烘箱中烘干至恒质量后称量, 最后取每个样地内 3 个小样方数据的平均值作为该样地的地上生物量实测值。

考虑到野外实测数据存在一定误差, 故对采样数据进行预处理, 最终选择的三江源区草地上生物量采样点共计 164 个, 其中包括 105 个高寒草甸采样点, 59 个高寒草原采样点。研究区域草地采样点空间分布如图 2 所示。

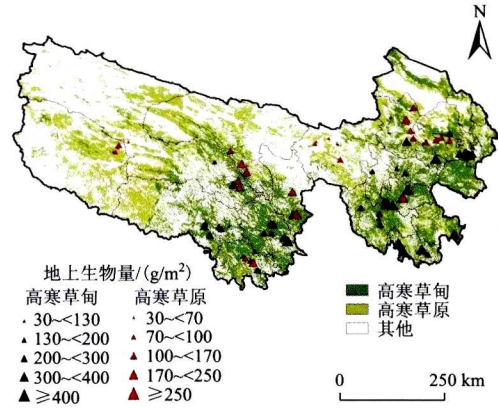


图 2 草地上生物量采样点空间分布

Fig. 2 The spatial of grassland aboveground biomass sample points

1.2.3 地上生物量的影响因素

草地植被生物量的增加是在生长期不断进行光合作用、累积光合产物的过程。考虑到光、温、水对植被生长的重要作用, 以及地形、海拔对植被生长环境的影响, 将光、温、水因素和海拔作为植被生物量估算模型的重要驱动因子。另外, 遥感植被指数能很好地指示地表植被的生长状况, 许多研究<sup>[16-18]</sup>表明其与草地上生物量具有很高的相关性。所以最终选择的模型驱动因子为光合有效辐射、年均气温、年降水量、海拔以及增强型植被指数。其中, 海拔数据由中国科学院地理科学与资源研究所提供。光合有效辐射、年均气温、年降水量空间数据则是以中国气象局提供的全国站点观测数据为基础, 同时结合 DEM 数据, 利用 ANUSPLIN 软件进行气象要素空间化得到。遥感植被指数则是由 MODIS 的 MOD09A1 产品进行波段运算〔见式(1)〕<sup>[25]</sup>获得。

$$EVI = G \times (\rho_{nir} - \rho_{red}) / [\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L] \quad (1)$$

式中:  $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{blue}$  分别为近红外波段 (NIR, 841 ~ 874 nm)、红波段 (620 ~ 670 nm)、蓝波段 (459 ~ 478 nm) 的地表反射率;  $G$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  和  $L$  为经验系数, 取值分别为 2.5、6、7.5 和 1。

1.3 BP 神经网络模型构建与评估方法

神经网络作为一种以计算机模拟人脑神经和应激行为的计算系统, 特别适用于有丰富解决问题的经验知识和数据但缺乏精确计算公式的领域<sup>[26-27]</sup>。BP 神经网络作为一种典型的前馈型神经网络模型, 具有简单、易行、计算量较小等优点, 是目前神经网络训练应用的最多也是最为成熟的算法之一。基于

Matlab2014a 软件平台,分别对高寒草甸和高寒草原构建了 BP 神经网络模型,技术流程如图 3 所示.根据野外调查所获取的草地样本点地理坐标,提取相应的光合有效辐射、年均气温、年降水量、增强型植被指数和海拔数据,用于 BP 神经网络草地地上生物量估算模型的训练.该研究采用多输入单输出的三层(输入层、隐层、输出层)网络结构,隐层节点数设置为 6.根据实际数据的特点以及多次模型训练的结果精度,通过多次反复训练与测验,选取其中最优的神经网络结构模型,用于草地地上生物量的空间尺度估算.

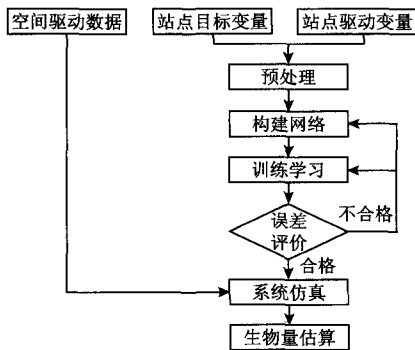


图 3 BP 神经网络技术流程

Fig. 3 Flow chart of the BP neural network

对于 BP 神经网络模型的拟合精度,采用  $R$  (相关系数) 和 RMSE (均方根误差) 进行评价:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^p [y_i - [\sum_{i=1}^p y_i]/p][y_i' - [\sum_{i=1}^p y_i']/p]}{\sqrt{\sum_{i=1}^p [y_i - [\sum_{i=1}^p y_i]/p]^2 [y_i' - [\sum_{i=1}^p y_i']/p]^2}} \quad (2)$$

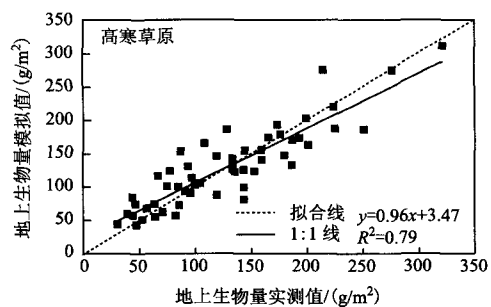
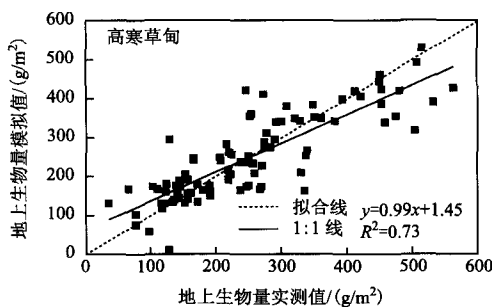


图 4 草地地上生物量的 BP 神经网络模拟值与实测值比较

Fig. 4 The comparison between measured and estimated grassland aboveground biomass

模型训练结果显示,高寒草甸地上生物量模拟值与实测值间相关系数达到 0.88, RMSE 为  $57.90 \text{ g/m}^2$ ;对于高寒草原,地上生物量模拟值与实测值间相关系数高达 0.91, RMSE 为  $26.10 \text{ g/m}^2$ ,相对于多元线性回归模型和增强型植被指数二项式回归模型的拟合效

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (y_i - y_i')^2}{p}} \quad (3)$$

式中: $p$  为样本个数; $y_i'$  为样本  $i$  的地上生物量模拟值,  $\text{g/m}^2$ ;  $y_i$  为样本  $i$  的地上生物量实测值,  $\text{g/m}^2$ .

同时选择多元线性回归模型<sup>[28]</sup>、二项式回归模型<sup>[27]</sup>,以光合有效辐射、年均气温、年降水量、增强型植被指数、海拔作为多元线性回归模型的自变量,以增强型植被指数作为二项式回归模型的自变量进行试验,通过各模型结果比较,以验证 BP 神经网络模型的拟合效果.

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型可信度评估

基于三江源区草地地上生物量实测值,分别对高寒草甸、高寒草原构建 BP 神经网络模型.由图 4 可见,高寒草甸、高寒草原地上生物量模拟值与实测值拟合的  $R^2$  分别为 0.73、0.79,二者回归拟合线斜率均接近于 1,表明模型模拟值与实测值的变化具有较高的一致性.总体来看,对于高寒草甸,地上生物量实测平均值为  $236.43 \text{ g/m}^2$ ,BP 神经网络模型模拟平均值为  $237.68 \text{ g/m}^2$ ;对于高寒草原,地上生物量实测平均值和模型模拟平均值分别为  $127.20 \text{ g/m}^2$  和  $128.09 \text{ g/m}^2$ ,都非常相近,表明 BP 神经网络对地上生物量的模拟结果与实测值间的误差较低.因此认为该模型可以用来进行三江源区草地地上生物量的空间估算.

BP 神经网络模型、多元线性回归模型和增强型植被指数项式回归模型对高寒草甸、高寒草原地上生物量的拟合效果对比如表 1 所示.其中,BP 神经网络

果更佳. BP 神经网络模型验证和测试结果也均优于另外两种回归分析模型.

BP 神经网络模型估算表明,三江源区 2001—2010 年草地地上生物量多年均值为  $172.34 \text{ g/m}^2$ ,其中高寒草甸、高寒草原分别为  $214.81$ 、 $130.07 \text{ g/m}^2$ . 这



表 1 不同模型对高寒草甸和高寒草原地上生物量模拟效果对比

Table 1 The performance of different grassland aboveground biomass estimation models for alpine meadow and alpine steppe

模型类别	站点类型	训练		验证		测试	
		R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
BP 神经网络模型	高寒草甸	0.88	57.90	0.82	77.80	0.84	73.50
	高寒草原	0.91	26.10	0.95	16.68	0.78	34.31
多元线性回归模型	高寒草甸	0.48	85.57	0.66	77.64	0.76	82.34
	高寒草原	0.47	46.00	0.88	23.72	0.52	50.75
二项式回归模型	高寒草甸	0.68	87.50	0.72	92.82	0.83	72.27
	高寒草原	0.68	47.08	0.53	34.70	0.49	49.06

与已有相关研究结果存在一定差异,如韩波<sup>[29]</sup>基于三江源区 54 个采样点,通过遥感反演模型获取的该区域草地上生物量多年均值为 172.7 g/m<sup>2</sup>;朱宝文等<sup>[30]</sup>对青海湖高寒草甸、高寒草原地上生物量的研究表明,其草地上生物量为 91.5 ~ 223.0 g/m<sup>2</sup>. 究其原因,可能是研究区域和时间范围不同,或者各研究所采用的样本点数据来源不同所致.

2.2 三江源草地上生物量空间分布格局

2001—2010 年间三江源区草地上生物量空间分布格局基本一致,存在较明显的异质性,主要表现为从西北部向东南部逐渐递增的趋势. 三江源区草

地上生物量多年平均值的空间分布格局及其与海拔、光合有效辐射、年均气温、年降水量空间分布的关系如图 5 所示,相对而言,草地上生物量空间分布特征与降水的变化趋势最为一致,均表现为自东南向西北递减. 总体来看,三江源区东部和南部地区降水较为充沛且温度较高,多年平均年降水量在 500 mm 以上,草地上生物量也较高,西部和北部地区降水偏少、温度较低,草地上生物量也相对较低.

三江源区西北部的草地上生物量基本都小于 120 g/m<sup>2</sup>,中南部处于 180 ~ 310 g/m<sup>2</sup> 之间,而东南部

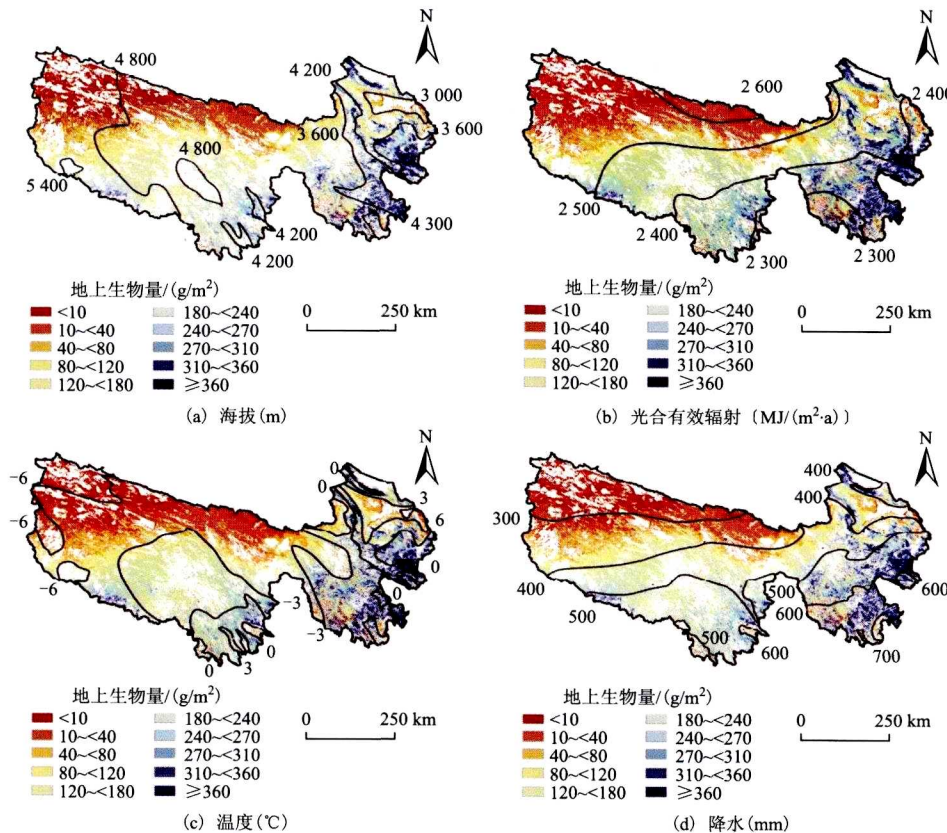


图 5 三江源区草地上生物量与各环境因子等位线空间分布的关系

Fig. 5 The spatial distribution of grassland aboveground biomass along with the contours of environmental factors in the Three-River Headwaters Region

则普遍高于  $310 \text{ g/m}^2$ 。由表 2 可见,位于三江源北部的曲麻莱草地地上生物量最低 ( $69.04 \text{ g/m}^2$ ),治多县、唐古拉山乡和尖扎草地地上生物量相对较低,分别为  $94.36$ 、 $98.90$ 、 $99.58 \text{ g/m}^2$ 。位于三江源东部的河南县草地地上生物量最高 ( $413.46 \text{ g/m}^2$ ),久治县、泽库县、同德县的草地地上生物量相对较高,分别为  $336.46$ 、 $297.95$ 、 $256.93 \text{ g/m}^2$ 。

表 2 2001—2010 年三江源草地地上生物量平均值的县域统计结果

Table 2 Statistics of grassland aboveground biomass in all counties of the Three-River Headwaters Region  $\text{g/m}^2$

州/乡	县	2011 年 平均值	2010 年 平均值	2001—2010 年	
				平均值	标准差
黄南州	同仁	273.06	249.63	220.16	148.11
	尖扎	175.58	155.42	99.58	132.90
	泽库	356.65	361.78	297.95	115.05
	河南县	468.89	501.34	413.46	139.60
	合计	371.40	380.26	313.54	162.96
海南州	共和	275.19	268.69	234.77	117.91
	同德	299.35	303.25	256.93	100.63
	贵德	216.69	207.24	136.99	120.81
	兴海	201.58	211.03	196.04	107.16
	贵南	268.71	252.24	183.19	112.84
合计	247.81	245.96	207.67	116.41	
果洛州	玛沁	217.59	236.88	221.13	106.15
	班玛	291.86	272.91	237.14	136.84
	甘德	277.26	290.23	250.11	93.66
	达日	261.35	250.85	214.66	129.73
	久治	363.64	370.95	336.46	118.47
	玛多	60.91	109.45	128.50	63.30
合计	225.71	238.93	219.20	125.34	
玉树州	玉树	273.61	220.96	225.95	70.76
	杂多	197.14	147.48	174.09	55.73
	称多	190.59	186.23	195.04	72.66
	治多	82.89	115.65	94.36	74.18
	囊谦	258.96	182.95	186.67	87.17
	曲麻莱	47.34	89.97	69.04	58.73
合计	143.45	139.52	135.51	88.76	
唐古拉山乡		57.40	153.09	98.90	70.67

### 2.3 三江源草地地上生物量动态变化特征

在 ArcGIS 10.0 中对 2001—2010 年三江源区草地地上生物量空间估值进行地图代数运算,得到草地地上生物量的逐年均值,并用线性回归方法分析其变化趋势。总体来看,2001—2010 年三江源区草地地上生物量呈微弱的波动缓慢上升趋势,平均升幅为  $0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (见图 6)。这与 2001—2010 年间全国乃至全球植被生产力、生物量均有所提高的趋势<sup>[31-32]</sup>相一致。三江源区多年气候变化分析结果显示,该区域呈较明显的暖湿化变化趋势,从而引起草地地上生物量有所增长<sup>[33-34]</sup>。

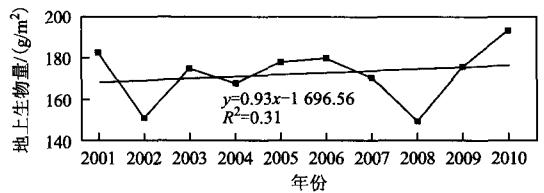


图 6 2001—2010 年三江源区草地地上生物量的年际变化

Fig. 6 Inter-annual variation of grassland aboveground biomass in the Three-River Headwaters Region during 2001-2010

研究<sup>[35]</sup>表明,草地生物量的年际变化容易受到降水的影响;同时也有研究<sup>[36-37]</sup>认为,北半球高纬度地区植被生物量或生产力主要受到气候变暖的驱动而增加。对于三江源区而言,整体温度呈现升高趋势,降水也有所增加,草地地上生物量同样表现出微弱的波动上升趋势。从草地地上生物量年际变化对温度和降水量的响应来看,草地地上生物量的增长与降水量的关系并不显著 ( $R^2 = 0.009$ ,  $P > 0.05$ ),但与温度呈较显著正相关 ( $R^2 = 0.42$ ,  $P < 0.05$ ) (见图 7)。这说明三江源区高寒草甸、高寒草原地上生物量在各环境因素中受温度的影响较降水量而言更为明显。

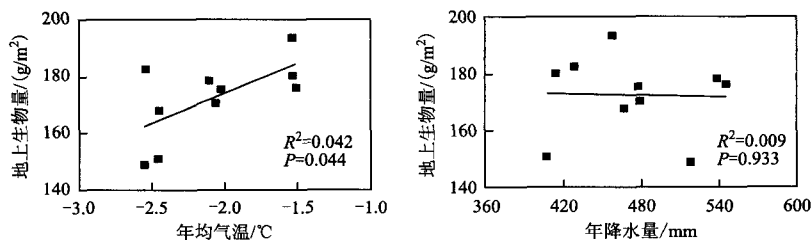


图 7 2001—2010 年三江源区草地地上生物量与气候因子之间的关系

Fig. 7 Relationship between climate variables and grassland aboveground biomass in the Three-River Headwaters Region

### 3 结论

a) 经过站点数据训练和验证的 BP 神经网络模型能够较好地模拟三江源区草地地上生物量,模拟结果与实测值吻合度较高,表明该 BP 神经网络模型可以用于三江源区草地地上生物量的空间估算。

b) BP 神经网络模型空间估算结果显示,三江源区草地地上生物量的多年均值为  $172.34 \text{ g/m}^2$ ,其中高寒草甸地上生物量为  $214.81 \text{ g/m}^2$ ,高寒草原地上生物量为  $130.07 \text{ g/m}^2$ 。

c) 三江源区草地地上生物量空间分布呈现明显的异质性特征,表现为东部和南部较高、西部和北部较低的分布格局。分县统计结果显示,位于三江源区东部的河南县草地地上生物量最高,为  $413.46 \text{ g/m}^2$ ;位于北部的曲麻莱草地地上生物量最低,为  $69.04 \text{ g/m}^2$ 。

d) 2001—2010 年间三江源区域草地地上生物量呈现波动缓慢上升的趋势,平均升幅为  $0.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

#### 参考文献 (References):

- [1] 李林,李凤霞,郭安红,等.近43年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J].自然资源学报,2006,21(1):79-85.  
LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, *et al.* Study on the climate change trend and its catastrophe over 'Sanjiangyuan' region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79-85.
- [2] 芦清水,赵志平.应对草地退化的生态移民政策及牧户[J].地理研究,2009,28(1):143-152.  
LU Qingshui, ZHAO Zhiping. Eco-immigration policy for the degraded rangeland and response of herd families; a case study of Maduo County, the source region of Yellow River[J]. Geographical Research, 2009, 28(1): 143-152.
- [3] 王根绪,程国栋.江源区的草地资源特征与草地生态变化[J].中国沙漠,2001,21(2):101-107.  
WANG Genxu, CHENG Guodong. Characteristics of grassland and ecological changes of vegetation in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 101-107.
- [4] SCURLOCK J M O, HALL D O. The global carbon sink: a grassland perspective[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 229-233.
- [5] SCURLOCK J M O, JOHNSON K, OLSON R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 736-753.
- [6] NI J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China[J]. Plant Ecology, 2004, 174(2): 217-234.
- [7] JOBBAGY E G, SALA O E. Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 541-549.
- [8] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, *et al.* Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [9] YANG Yuanhe, FANG Jingyun, JI Chengjun, *et al.* Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands[J]. Journal of Vegetation Science, 2009, 20(1): 177-184.
- [10] FAN Jiangwen, ZHONG Huaping, HARRIS W, *et al.* Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass[J]. Climatic Change, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [11] YANG Y H, FANF J Y, PAN Y D, *et al.* Aboveground biomass in Tibetan grasslands[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(1): 91-95.
- [12] 李晓东,李凤霞,周秉荣,等.青藏高原典型高寒草地水热条件及地上生物量变化研究[J].高原气象,2012,31(4):1053-1058.  
LI Xiaodong, LI Fengxia, ZHOU Binrong, *et al.* Study of hydrothermal condition and aboveground biomass in typical alpine grassland in Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(4): 1053-1058.
- [13] KOGAN F, STARK R, GITELSON A, *et al.* Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(14): 2889-2896.
- [14] 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[J].草地学报,2010,18(1):5-10.  
FAN Jiangwen, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan, *et al.* Dynamic changes of grassland yield in Three River Headwater Region from 1988 to 2005[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(1): 5-10.
- [15] 闫瑞瑞,杨桂霞,张宏斌,等.呼伦贝尔草甸草原牧草产量及载畜力估算[J].草业科学,2010,27(12):140-147.  
YAN Ruirui, YANG Guixia, ZHANG Hongbin, *et al.* Estimation of meadow steppe yield and carrying capacity of meadow grassland in Hulunber region[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(12): 140-147.
- [16] 李素英,李晓兵,莺歌,等.基于植被指数的典型草原区生物量模型:以内蒙古锡林浩特市为例[J].植物生态学报,2007,31(1):23-31.  
LI Suying, LI Xiaobing, YING Ge, *et al.* Vegetation indexes-biomass models for typical semi-arid steppe: a case study for Xilinghot in northern China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 23-31.
- [17] WEISBERG S. Applied linear regression[M]. Sanford, America: John Wiley & Sons, 2005.
- [18] XIE Yichun, SHA Zongyao, YU Mei, *et al.* A comparison of two models with Landsat data for estimating above ground grassland biomass in Inner Mongolia, China[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(15): 1810-1818.
- [19] 琚存勇,蔡体久.鄂尔多斯草地生物量估测的 GRNN 模型实现[J].北京林业大学学报,2008(S1):296-299.  
JU Cunyong, CAI Tiju. Estimation of aboveground biomass using GRNN model in Ordos grassland, Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008(S1): 296-299.
- [20] SADEGHI B H M. A BP-neural network predictor model for plastic

- injection molding process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(3): 411-416.
- [21] CHEN W C, TAI P H, WANG M W, *et al.* A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 843-849.
- [22] 邵全琴. 三江源区生态系统综合监测与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] 刘敏超, 李迪强, 栾晓峰, 等. 三江源地区生态系统服务功能与价值评估[J]. *植物资源与环境学报*, 2005, 14(1): 40-43.  
LIU Minchao, LI Diqiang, LUAN Xiaofeng, *et al.* Ecosystem services and its value evaluation of Sanjiangyuan Region [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2005, 14(1): 40-43.
- [24] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [25] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 195-213.
- [26] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [27] LAMPINEN J, VEHTARI A. Bayesian approach for neural networks: review and case studies [J]. *Neural Networks*, 2001, 14(3): 257-274.
- [28] 游浩妍. 基于地理加权回归的草原产草量遥感估算模型研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [29] 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.
- [30] 朱宝文, 周华坤, 徐有绪, 等. 青海湖北岸草甸草原牧草生物量季节动态研究[J]. *草业科学*, 2008, 25(12): 62-66.  
ZHU Baowen, ZHOU Huakun, XU Youxu, *et al.* Study on seasonal dynamics of biomass in meadow grassland of north shore of Qinghai Lake [J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(12): 62-66.
- [31] MA Wenhong, FANG Jingyun, YANG Yuanhe, *et al.* Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006 [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53: 841-850.
- [32] CAO M, PRINCE S D, TAO B, *et al.* Regional pattern and interannual variations in global terrestrial carbon uptake in response to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2005, 57(3): 210-217.
- [33] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J]. *科学通报*, 2007, 52(21): 2535-2541.  
ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, YANG Xiaoqiong, *et al.* Influence analysis of climate change on the net primary production of the terrestrial vegetation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(21): 2535-2541.
- [34] 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[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.  
WANG Junbang, LIU Jiyuan, SHAO Quanqin, *et al.* Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988-2004 based on CLOPEM-CEVSA model in the 'Three-River Headwaters' Region of QinHai Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254-269.
- [35] WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, *et al.* Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11.
- [36] SCHMEL D S, PARTICPANTS V, BRASWELL B H. Continental scale variability in ecosystem processes: models, data, and the role of disturbance [J]. *Ecological Monographs*, 1997, 67(2): 251-271.
- [37] TUCKER C J, SLAYBACK D A, PINZON J E, *et al.* Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.

(责任编辑:周巧富)