#### DOI: 10.5846/stxb201605040840

巩杰,张影,钱彩云.甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化.生态学报,2017,37(15):5121-5128.
Gong J, Zhang Y, Qian C Y.Temporal and spatial distribution of net ecosystem productivity in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15):5121-5128.

# 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化

## 巩 杰\*,张 影,钱彩云

兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室,兰州 730000

**摘要:**净生态系统生产力(NEP)是估算区域植被碳源、碳汇的重要指标。以甘肃白龙江流域为研究区,结合 MODIS 与气象数 据对 2000—2013 年的流域净生态系统生产力时空变化进行了研究,并探讨了典型地形因子对 NEP 的影响。结果表明:(1) 2000—2013 年甘肃白龙江流域单位面积 NEP 平均为 226.65 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,碳汇区主要分布在白龙江上游两岸、岷江西岸、白水江 南岸、大团鱼河两岸的山地林区,碳源区主要分布在武都区、迭部县北缘的高寒草甸区等。(2)从不同植被类型上看,常绿阔叶林、常绿/落叶阔叶混交林单位面积 NEP 最高,高寒草地单位面积 NEP 最小,且耕地单位面积 NEP 增加最明显,常绿/落叶阔叶 混交林单位面积 NEP 降低最明显。(3) 2000—2013 年研究区单位面积 NEP 总体上呈增加的趋势,增加明显的地区分布在流域 的中部和西北部,4—9 月为流域碳汇季节。(4) 地形因子对甘肃白龙江流域 NEP 有明显影响,海拔 4200 m 以下多为碳汇区;陡 坡区的碳汇能力的增长趋势低于缓坡区;阴坡的碳汇能力高于阳坡区。

关键词:净生态系统生产力;碳汇;碳源;时空变化;甘肃白龙江流域

# Temporal and spatial distribution of net ecosystem productivity in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

#### GONG Jie<sup>\*</sup>, ZHANG Ying, QIAN Caiyun

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education) of College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract**: Net ecosystem productivity (NEP) is an important factor for the regional estimation of carbon sources and carbon sinks, and the accurate estimation of these components of the carbon cycle is imperative to be able to predict climate change and establish reasonable environmental policies. In this study, we analyzed the temporal and spatial distribution of net ecosystem productivity on a unit area basis in the Bailongjiang Watershed, Gansu Province, China, from 2000—2013 via using MODIS and meteorological data and then explored the relationship between NEP and topographical factors. Four primary results were obtained: (1) The mean annual NEP was 226.65 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> from 2000 to 2013 in the watershed, and the carbon sink area accounted for 97.20% of the whole watershed area. The carbon sinks were mainly distributed in forest land along both sides of the upper Bailongjiang, the west bank of the Minjiang, the southern bank of the Baishuijiang, and both banks of the Datuanyu River. The carbon source areas were mainly distributed in the wudu District and the northern border area of Diebu County. (2) Mean annual NEP was highest for evergreen broad-leaved forest and mixed evergreen and deciduous, broad-leaved forest followed by the mountain steppe. Mean annual NEP for cultivated land, coniferous forest, and shrubland was similar, and even smaller for the alpine steppe. While NEP tended to increase over time in cultivated land, the trend was a slight decline in mixed evergreen and deciduous, broad-leaved forest. (3) There was significant

收稿日期:2016-05-04; 网络出版日期:2017-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41271199)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jgong@lzu.edu.cn

spatial heterogeneity in the trends of how NEP changed over time. Specifically, NEP tended to increase in the Bailongjiang Watershed, which accounted for 64.00% of the study area and were mainly distributed in the central and northwest regions of the watershed, particularly in the mid-Bailongjiang River, and NEP that tended to decrease was mainly distributed in the centre of Wudu District. Additionally, the period from April to September is when both NEP and the carbon sink areas increase. (4) Topographical factors played an important role in NEP in the Bailongjiang Watershed. The area below 4200 m was the primary carbon sink area, and the NEP growth rate and carbon sink capability on steep slopes (over 40 degrees) were higher than in areas with a gentler slope. Further, the capacity of carbon sinks on shady slopes was higher than for those on sunny slopes.

Key Words: net ecosystem productivity (NEP); carbon sink; carbon source; temporal-spatial variation; Bailongjiang Watershed of Gansu Province

陆地生态系统碳循环是全球变化研究的核心内容之一。陆地生态系统各碳库的碳储量、碳密度及其空间 变化研究已取得了很多成果<sup>[1-2]</sup>,但由于陆地生态系统碳循环过程机制的复杂性,定量评估生态系统的碳库 变化过程、生态系统碳源/碳汇强度及时空变化规律,是当前急需回答的重要科学问题<sup>[3]</sup>。陆地生态系统碳 循环及其对气候变化的响应研究多集中在植被净初级生产力(NPP)<sup>[4-6]</sup>,即单位时间单位面积上植被所能生 产的有机干物质总量,是光合作用所吸收的碳和呼吸消耗的碳的差值<sup>[7]</sup>。目前,对陆地碳循环的研究转向净 生态系统生产力(NEP)<sup>[8-9]</sup>,即生态系统碳的净吸收或净排放,代表着陆地生态系统和大气生态系统的净 CO<sub>2</sub> 交换量,定量描述了陆地生态系统碳源汇的能力<sup>[10]</sup>。国内外对陆地生态系统碳收支进行了大量研究,普遍认 为陆地生态系统起着大气 CO<sub>2</sub>碳汇的作用,但是对碳汇及其空间格局变化的估算仍存在很大的不确定 性<sup>[11-13]</sup>。国际上对 NEP 的研究主要集中在 NEP 的时空动态、影响因素及不确定性分析,认为气候变化、降 水、温度、海拔和土壤等对 NEP 有重要影响<sup>[8,14-15]</sup>,且研究主要集中在草地和森林等生态系统类型;国内常借 助 CEVSA 模型、Biome-BGC 模型以及 CASA 模型等分析 NEP 的时空动态变化<sup>[9,16-17]</sup>。区域的 NEP 变化研究 及其生态系统碳汇及碳源变化对于碳循环过程研究、预测气候变化及制定政策都具有重要意义<sup>[18-19]</sup>。

甘肃白龙江流域作为长江上游重要的水源地和生态屏障,地质构造复杂,地貌类型多样,生态环境脆弱, 地质灾害频发。该地区碳循环对气候变化的响应的研究主要集中在碳储量、碳密度、生物量及净初级生产力 的研究<sup>[20-23]</sup>,NEP 时空动态及地形因子对 NEP 影响的分析报道较为鲜见。本文结合 MODIS 与气象数据对 甘肃白龙江流域 2000—2013 年的净生态系统生产力时空动态进行了研究,并探讨了其与地形因子的关系,以 期为该地区生态系统碳循环、碳储蓄动态变化提供科学依据。

#### 1 研究区概况与研究方法

#### 1.1 研究区概况

甘肃白龙江流域(32°36′ — 34°24′N,103°00′ — 105°30′E)位于甘肃省东南部,是长江二级支流嘉陵江 上游重要的水土保持和水源涵养地。流域面积约18437.7 km<sup>2</sup>,在行政单元上包括迭部县、舟曲县、武都区、宕 昌县和文县,地势自西北向东南倾伏,海拔高差大,高山峻岭与峡谷盆地相间分布、沟壑纵横。气候类型复杂 多样,夏季高温多雨,冬季温凉少雨,年均气温 6 — 15℃,年均降水量 400 — 850 mm。流域土壤以山地棕壤、 淋溶褐土、黑垆土、黄壤土为主,有机质含量高,土壤肥沃,但是坡陡土薄,极易造成严重的土壤侵蚀和水土流 失使土壤肥力、生产能力下降<sup>[22]</sup>。由于境内山大沟深,高低相差悬殊,植被垂直分异明显,白龙江林区海拔在 600 m 以下主要为常绿阔叶林,栎类较多;600 — 3700 m 之间多为亚高山针叶林;3700 — 4100 m 之间为高山 灌丛分布带;4100 m 以上主要被裸岩和高山草甸覆盖<sup>[24]</sup>。常绿落叶阔叶混交林属于亚热带植被类型,在武 都区和文县都有分布,落叶阔叶林主要以栎、杨、桦类为主<sup>[22]</sup>。

5123

(1)

1.2 数据来源

本文研究使用的遥感数据为 2000—2013 年 250 m 分辨率的 MOD13Q1 数据,气象数据来源于白龙江流域 各市县气象局和中国气象科学数据共享服务网等,主要包括 2000—2013 年 1—12 月甘肃白龙江流域及其周 边 17 个气象站点的逐月降水量(mm),逐月平均气温(°C)、逐月平均风速、逐月日照时数和逐月相对湿度数 据,利用 CASA 模型计算得到流域植被 NPP<sup>[22]</sup>。基于气象数据利用 Kriging 进行空间插值,生成 250 m 分辨 率的气温和降水栅格数据。

1.3 NEP 计算

净生态系统生产力(NEP)定义为生态区内植被净初级生产力(NPP)与土壤微生物呼吸碳排放(RH)之 差<sup>[7,25]</sup>,其被认为是陆地和大气生态系统的碳交换率<sup>[26]</sup>,是区域上碳平衡估算的重要指标,常常作为碳汇大 小的度量<sup>[27]</sup>。NEP 的计算公式为:

$$NEP = NPP - RH$$

式中,NEP为植被净生态系统生产力(gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>),NPP为植被净初级生产力(gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>),RH为土壤微生物呼吸量(gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)。若NEP >0,则表明植被固定的碳高于土壤排放的碳,表现为碳汇;反之,若NEP <0,则表现为碳源。上式中的RH可利用温度、降水与碳排放的回归方程计算得来<sup>[19]</sup>:

RH =  $0.22 \times (e(0.0913T) + \ln(0.3145R + 1)) \times 30 \times 46.5\%$  (2) 式中, T 为气温(°C), R 为降水(mm)。

#### 2 结果分析

#### 2.1 植被净生态系统生产力空间分布特征

2000—2013年甘肃白龙江流域年平均单位面积 NEP 空间分布差异显著(图1);各年不同单位面积 NEP 的面积分布变化明显(图2),单位面积 NEP 年平均值为 226.65 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。可以看出,甘肃白龙江流域大部 分地区为碳汇区,NEP 为正值的区域占研究区域总面积的 97.20%,其中,单位面积 NEP 为 100—300 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的分布面积最大,约占 59.54%,且 2000—2013年每年的碳汇与碳源面积波动变化。单位面积 NEP 较高的 区域主要为迭部县大部,宕昌县西南部,舟曲中部,武都区南缘,文县的大部,约在 200 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>以上;而宕昌





Fig.1 Spatial distribution of mean annual unit area NEP during 2000-2013 in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province

图 2 2000—2013 年甘肃白龙江流域各年单位面积 NEP 面积分布 Fig. 2 Area change on different annual unit area NEP during 2000—2013 in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province 县东北部和东南部、舟曲县城周边,武都区南部、文县的西部北部边缘等地单位面积 NEP 较低,约为 0—200 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;迭部县北部边缘、舟曲县东部边缘、武都区北部、文县县城周边等为碳源区,碳源区面积约占研究区 域总面积的 2.80%。

甘肃白龙江流域各植被类型年均 NEP 统计结果如表 1,不同植被类型中常绿阔叶林、常绿/落叶阔叶混交 林和落叶阔叶林的单位面积 NEP 较高,其次是高山草地,而耕地、针叶林、灌丛单位面积 NEP 值差别不显著, 高寒草地单位面积 NEP 最小。在植被 NEP 总量中,落叶阔叶林的最大(为 1.51 Tg C/a),占研究区植被 NEP 总量的 37.70%;其次是耕地和常绿针叶林,NEP 总量分别为 0.68 Tg C/a 和 0.66 Tg C/a,两者占研究区植被 NEP 总量的 33.70%;高山草地的 NEP 总量最少(为 0.03 Tg C/a)。

Table 1 Mean annual NEP, total NEP and NEP change trend from 2000-2013 in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province				
植被类型 Vegetation type	面积百分比 Area ration	单位面积 NEP Unit area NEP/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	NEP 总量 Total NEP/(Tg C/a)	年际变化趋势 NEP change trend/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )
落叶阔叶林	24.60%	347.82	1.510	1.81
常绿针叶林	23.60%	159.25	0.665	1.29
耕地	19.60%	197.28	0.685	2.63
灌丛	11.90%	168.98	0.357	0.80
针阔混交林	8.40%	174.99	0.260	1.53
高寒草地	5.90%	97.11	0.101	2.12
常绿、落叶阔叶混交林	3.16%	408.87	0.229	-1.31
落叶针叶林	1.13%	193.96	0.039	0.63
常绿阔叶林	1.08%	715.24	0.136	2.41
高山草地	0.65%	232.53	0.027	-0.20

#### 表 1 甘肃白龙江流域各植被类型年均 NEP

#### 2.2 植被净生态系统生产力时间分布特征

5124

2000—2013年甘肃白龙江流域 NEP 总量总体上呈 增加的趋势(图 3),年均值为 4.04 Tg C/a,年均 NEP 总 量最大值为 2013年(4.90 Tg C/a),其次是 2003年 (4.89 Tg C/a),最小值为 2000年(3.01 Tg C/a)。甘肃 白龙江流域单位面积 NEP 年际变化趋势呈现出明显的 空间差异性(图 4),且以正值为主,占研究区域总面积 的 64.00%,主要分布在研究区中部和西北部,单位面积 NEP 明显增加的面积占 0.97%(NEP 年际变化趋势>15 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),主要分布在白龙江中游两岸;单位面积 NEP 减少的区域主要分布在迭部县东北部、宕昌县西 部、文县南部和武都区南部,其中,武都区东南部大团鱼 河的下游单位面积 NEP 较少较明显。研究时段内,甘





肃白龙江流域单位面积 NEP 明显增加的植被类型为耕地(2.63 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、常绿阔叶林(2.41 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、 高寒草地(2.12 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>);单位面积 NEP 减少的植被类型为常绿、落叶阔叶混交林(-1.31 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和高 山草地(-0.20 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)(表 1)。

从 NEP 的月际变化趋势来看,4—9月月均 NEP 为正值,为碳汇季节(图5)。在碳汇季节,2003 年 8 月月 均单位面积 NEP 最高(90.40 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),其次是 2008 年 6 月的月均单位面积 NEP(79.70 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)。总 体来看,在 2000—2013 年时间段内,8 月和 6 月的月变化幅度最大,且各月的月均单位面积 NEP 逐年增加(除 7 月外);从 10 月开始研究区逐渐从碳汇转变为碳源,11—2 月月均 NEP 为负值,为碳源季节,且各月月均

N 迭部县 舟曲县 净生态系统生产力  $NEP/(g C m^{-2} a^{-1})$ <-15 武都区 -15--15 -10--5-0 0-5 5 - 1010-15 >15 80km 40 县(区)界行政中心 □ 甘当白龙江流域 白龙江水系

图 4 甘肃白龙江流域 2000—2013 年单位面积 NEP 变化趋势的 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of unit area NEP change trend during 2000—2013 in the BailongjiangWatershed of Gansu Province



3.3.1 甘肃白龙江流域单位面积 NEP 随海拔梯度的变化特征

甘肃白龙江流域海拔落差很大(海拔 568 — 4866 m),且峰高坡陡、山峦起伏。根据研究区植被在垂直地带上的分布状况及同—植被景观类型在海拔梯度上的临界高差等实际情况,为了研究 NEP 在不同海拔上的变化趋势,以 200m 为一个梯度,将流域海拔划分为 22 个级别。研究表明,流域内单位面积 NEP 总体上随海拔高度增加呈先增加后减小的态势(图 6)。具体地,在 568 — 1400 m 的海拔区段,流域内单位面积 NEP 随海拔高度增加而不变或轻微减小,在 1400 — 3400 m 的海拔区段内,单位面积 NEP 随海拔高度增加而增加,



#### 图 6 甘肃白龙江流域不同高程上的 NEP 值和 NEP 变化趋势

**Fig.6** Mean annual NEP and NEP change trend in the different elevation in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province 柱状图为单位面积 NEP,折线图为年际变化趋势

NEP 逐年变大(除11月外),碳源能力减小。





5125

在 3200 — 3400 m 出现最大值,其单位面积 NEP 约 270 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。在 3400 m 以上的海拔区域,流域内 NEP 逐渐减少,在 4200 m 以上转为负值。从年际变化趋势上看,甘肃白龙江流域单位面积 NEP 在不同高程上的 变化的空间差异性很小,主要集中在 5.81 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>附近,在 800 — 2200 m 海拔区域段内略高于其他区域。 3.3.2 甘肃白龙江流域单位面积 NEP 随坡度的变化特征

甘肃白龙江流域单位面积 NEP 随坡度增加整体变化不大,在 170 — 240 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间波动,呈先增加 后减小的趋势(图 7)。具体地,在 0° — 65°之间单位面积 NEP 逐渐增加,在> 65°的陡坡,单位面积 NEP 随坡 度的增加而减少,且减少趋势相对明显。从年际变化趋势上看,甘肃白龙江流域单位面积 NEP 在不同坡度上 的变化的空间差异性很小,主要集中在 5.87 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>附近,具体地,随坡度增大,在 0° — 25°单位面积 NEP 的增加趋势缓慢增长,在 25° — 40°单位面积 NEP 的增加趋势保持稳定,> 40°单位面积 NEP 的增加趋势逐 渐下降,极陡坡的单位面积 NEP 的增长趋势最小。





**Fig.7** Mean annual NEP and NEP change trend in the different slope in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province 柱状图为单位面积 NEP, 折线图为年际变化趋势

3.3.3 甘肃白龙江流域单位面积 NEP 随坡向的变化特征 甘肃白龙江流域内不同坡向上单位面积 NEP 分布 差异很小(平均为 227.34 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),但具有一定的分 布规律,单位面积 NEP 表现为阴坡>半阴坡>半阳坡> 阳坡(图 8)。从年际变化趋势上看,甘肃白龙江流域内 不同坡向上单位面积 NEP 的变化趋势变化不大,集中 在 5.86 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>附近,但分布格局与单位面积 NEP 相反,阴坡的变化趋势小于阳坡。





# 3 讨论

已有的 NEP 影响因素研究多集中在气温、降水量<sup>[9,16]</sup>和 NDVI,而地形是影响气候的重要因素<sup>[28]</sup>,目

前,地形对 NEP 的影响研究还较罕见,缺少相关的研究。本文研究发现,地形因素(如海拔、坡度、坡向)对 NEP 的影响明显,其可能的原因是在低海拔区植被类型、温度、降雨量变化较小,人类干扰强,植被分布较少 且长势较差,而随着海拔的升高,人类活动强度减弱,人为干扰减小,水热条件较好,森林分布最密集,分布有 中山落叶阔叶林-中山常绿阔叶林-中山阔叶混交林-亚高山针阔混交林-亚高山常绿针叶林等乔木林,单位面 积 NEP 较高,在高海拔地区,植被类型为高寒草地和灌丛,单位面积 NEP 较低,故在 4200 m 以上的海拔区表

5127

#### 现为碳源。

从 NEP 变化趋势上看,在 2000 m 以下的平缓区域单位面积 NEP 变化相对较大,高海拔区单位面积 NEP 变化很小,可能与人类活动变化<sup>[17]</sup>有关。且坡度越陡单位面积 NEP 增加的越小,要注重陡坡区的土地管理 与保护。阳坡的水热条件较好,比阴坡的单位面积 NEP 变化大,碳汇潜力比阴坡大。

从植被类型上看,甘肃白龙江流域单位面积 NEP 与基于 CASA 和 CEVSA 模型的石羊河上游<sup>[29]</sup>和西南高山<sup>[30]</sup>的单位面积 NEP 空间分布结果相似,数值上存在差异,流域土壤微生物呼吸碳排放是导致研究结果差异性的重要原因。耕地的单位面积 NEP 为 197.28 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, NEP 总量较高(0.68 Tg C/a),且单位面积 NEP 变化率最高(2.63 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),由于耕地的面积较大,在流域内单位面积 NEP 增长最快,故耕地的碳汇总量 仅次于落叶阔叶林,是研究区重要的碳汇区。同时,常绿、落叶阔叶混交林具有很高的单位面积 NEP(408.87 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),但年际变化趋势为负值(-1.31 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),表明单位面积 NEP 正逐年降低,这与人类活动干扰 有关<sup>[17]</sup>。

#### 4 结论

甘肃白龙江流域单位面积 NEP 年平均值为 226.65 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,流域碳汇面积远高于碳源面积,单位面积 NEP 呈现出白龙江流域的上游和下游明显高于白龙江中游。单位面积 NEP 高值区主要分布在低中海拔的常绿阔叶林、常绿/落叶阔叶林,其次是耕地、草地、灌丛,而高海拔区的高寒草地的单位面积 NEP 较低。地形因素(如海拔、坡度、坡向)对 NEP 的影响明显,NEP 具有明显空间差异性;单位面积 NEP 总体上随海拔高度增加呈现为基本不变-增加-减小的态势,随坡度增大呈现增加-减少的趋势;阴坡的单位面积 NEP 最高,阳坡的单位面积 NEP 变化趋势相对较大。2000—2013 年,甘肃白龙江流域 64.00%以上区域的单位面积 NEP 呈增加的趋势,尤其耕地的固碳能力增强最明显。4—9 月为碳汇季节,其中,8 月和 6 月的碳汇能力变化幅度最大。

通过分析不同植被和景观类型的单位面积 NEP 分布及变化趋势,在耕地的碳汇能力逐渐增强的同时,今 后应对研究区林地加强保护,在维持和保护流域现存天然林等森林外,在低海拔和缓坡等区域应继续开展和 实施天然林保护等生态建设工程,努力改造低产低效林,多引进碳汇功能相对较高的树种,改变其碳汇能力下 降的趋势(尤其是常绿、落叶阔叶混交林覆被区)。

本文分析了甘肃白龙江流域 NEP 的时空变化情况,发现不同覆被类型和典型地形因子对 NEP 有明显影响。但由于 NEP 是自然和人类活动共同作用的结果,因此,定量分析人类活动对白龙江流域生态系统 NEP 的影响是下一步的研究重点,应采取不同方法和模型对陆地生态系统的碳源汇进行衡量,来减少估算的不确 定性,以便更好地认识陆地生态系统碳循环。

### 参考文献(References):

- [1] Ma J, Bu R C, Liu M, Chang Y, Qin Q, Hu Y M. Ecosystem carbon storage distribution between plant and soil in different forest types in Northeastern China. Ecological Engineering, 2015, 81: 353-362.
- [2] Dorji T, Odeh I O A, Field D J, Baillie I C. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas. Forest Ecology and Management, 2014, 318: 91-102.
- [3] 于贵瑞,方华军,伏玉玲,王秋凤.区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展.生态学报,2011,31(19):5449-5459.
- [4] Sun Z G, Sun C M, Zhou W, Ju W M, Li J L. Classification and net primary productivity of the southern China's grasslands ecosystem based on improved comprehensive and sequential classification system (CSCS) approach. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(4): 893-903.
- [5] Taelman S E, Schaubroeck T, De Meester S, Boone L, Dewulf J. Accounting for land use in life cycle assessment: the value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems. Science of the Total Environment, 2016, 550: 143-156.
- [6] 张翀,任志远.陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评.地理研究, 2015, 34(8): 1522-1534.
- [7] 陈斌, 王绍强, 刘荣高, 宋婷. 中国陆地生态系统 NPP 模拟及空间格局分析. 资源科学, 2007, 29(6): 45-53.
- [8] Grant R F, Baldocchi D D, Ma S. Ecological controls on net ecosystem productivity of a seasonally dry annual grassland under current and future

climates: modelling with ecosys. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152: 189-200.

- [9] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 黄玫, 郭瑞, 郝卫平, 夏旭. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态. 生态学报, 2014, 34(6): 1490-1502.
- [10] 常顺利,杨洪晓,葛剑平.净生态系统生产力研究进展与问题.北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):517-521.
- [11] Hannah L. Chapter 19-carbon sinks and sources // Hannah L, ed. Climate Change Biology. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2015: 403-422.
- [12] Mabicka Obame R, Copard Y, Sebag D, Abdourhamane Touré A, Boussafir M, Bichet V, Garba Z, Guillon R, Petit C, Rajot J L, Durand A. Carbon sinks in small Sahelian lakes as an unexpected effect of land use changes since the 1960s (Saga Gorou and Dallol Bosso, SW Niger). CATENA, 2014, 114; 1-10.
- [13] Zhang W T, Huang B, Luo D. Effects of land use and transportation on carbon sources and carbon sinks: a case study in Shenzhen, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 122: 175-185.
- [14] Elbers J A, Jacobs C M J, Kruijt B, Jans W W P, Moors E J. Assessing the uncertainty of estimated annual totals of net ecosystem productivity: a practical approach applied to a midlatitude temperate pine forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1823-1830.
- [15] Mekonnen Z A, Grant R F, Schwalm C. Sensitivity of modeled NEP to climate forcing and soil at site and regional scales: implications for upscaling ecosystem models. Ecological Modelling, 2016, 320: 241-257.
- [16] 穆少杰,周可新,陈奕兆,杨齐,李建龙.内蒙古典型草原不同群落净生态系统生产力的动态变化.生态学杂志,2014,33(4):885-895.
- [17] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 潘竞虎, 车彦军. 甘肃省净初级生产力时空变化特征. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 163-170.
- [18] Makkonen M, Huttunen S, Primmer E, Repo A, Hildén M. Policy coherence in climate change mitigation: an ecosystem service approach to forests as carbon sinks and bioenergy sources. Forest Policy and Economics, 2015, 50: 153-162.
- [19] 汤洁,姜毅,李昭阳,张楠,胡猛. 基于 CASA 模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 1-7.
- [20] 包琼. 白龙江干旱河谷自然恢复灌丛群落的土壤碳氮储量. 四川农业大学学报, 2014, 32(3): 277-282.
- [21] 闫倩倩,冯宜明,陈学龙.甘肃亚高山云杉人工林地上部分生物量研究.湖南林业科技,2016,43(1):93-96.
- [22] 高彦净. 基于 CASA 模型的植被 NPP 时空动态研究——以甘肃白龙江流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [23] 李亚刚. 基于改进光能利用率模型的甘南地区 NPP 研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015. PH
- [24] 巩杰,高彦净,张玲玲,谢余初,赵彩霞,钱大文.基于地形梯度的景观生态风险空间分析——以甘肃省白龙江流域为例.兰州大学学报:自然科学版,2014,50(5):692-698.
- [25] Tang X L, Fan S H, Qi L H, Guan F Y, Du M Y, Zhang H. Soil respiration and net ecosystem production in relation to intensive management in Moso bamboo forests. CATENA, 2016, 137: 219-228.
- [26] Zhang L, Guo H D, Jia G S, Wylie B, Gilmanov T, Howard D, Ji L, Xiao J F, Li J, Yuan W P, Zhao T B, Chen S P, Zhou G S, Kato T. Net ecosystem productivity of temperate grasslands in northern China: an upscaling study. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 71-81.
- [27] 裴志永,周才平,欧阳华,杨文斌.青藏高原高寒草原区域碳估测.地理研究,2010,29(1):102-110.
- [28] 刘军. 地形因素对气候的影响. 考试周刊, 2009, (35): 162-163.
- [29] 徐春华,张华,马瑞芬.石羊河上游净生态系统生产力研究.干旱区研究,2015,32(5):1039-1045.
- [30] 庞瑞,顾峰雪,张远东,侯振宏,刘世荣.西南高山地区净生态系统生产力时空动态.生态学报,2012,32(24):7844-7856.