

DOI: 10.5846/stxb201709211694

姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例. 生态学报, 2019, 39(8): - .
Ji P P, Gao M H, Yang X D. Analysis of NPP driving force in an arid region of Northwest China: A case study in Yili Valley and parts of Tianshan Mountains, Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析 ——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例

姬盼盼^{1,2}, 高敏华^{1,2,*}, 杨晓东^{1,2,3}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 自治区智慧城市与环境建模重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: NPP 作为全球生态系统稳定与生态安全评估的重要参数之一, 它的分布变化能间接反映区域生态平衡和自然环境演变。以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为研究区, 为探寻该区域 NPP 驱动因子及其驱动特点, 对 NPP、气候气象、土壤、植物和海拔数据做再处理与数理统计分析, 研究发现: (1) 该中纬度干旱区 NPP 的主导因素为水分与海拔。(2) 相关性分析得出, 年平均气温、年平均降水量、干燥度、湿润指数、高程和坡度与 NPP 有显著相关性 ($P < 0.01$)。(3) 不同环境温度下, 各环境因子对 NPP 的驱动能力有差异, 年均气温在 0 °C 以下区域 NPP 最强驱动因子为海拔 ($P < 0.01$), 而高于 0 °C 区域则为水分因子 ($P < 0.01$)。(4) 不同植被类型与土壤类型间 NPP 主要驱动因子及贡献率存在较大差异。(5) NPP 极值随海拔的升高先增大后减小, 海拔高度对 NPP 环境因子驱动能力起决定性作用。本文揭示了海拔因素对我国中纬度干旱区 NPP 的重要影响, 揭示了各环境条件下气候与地形因子对 NPP 的影响特点, 为干旱区 NPP 驱动力研究提供相关理论依据。

关键词: 干旱区; NPP; 海拔; 因子贡献率; 驱动力

Analysis of NPP driving force in an arid region of Northwest China: A case study in Yili Valley and parts of Tianshan Mountains, Xinjiang, China

Ji Panpan^{1,2}, GAO Minghua^{1,2,*}, YANG Xiaodong^{1,2,3}

1 Institute of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key laboratory Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Intelligent urban and environmental modeling, autonomous region, Urumqi 830046, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) is one of the important parameters for assessing global ecosystem stability and ecological safety, and changes to NPP distribution directly affect regional ecological function and natural environment evolution. Our study area forms part of the Yili River Valley and Tianshan Mountains in Xinjiang, China. Through analysis of mathematical statistics datasets composed of NPP, climate and meteorology, soil, and plant and elevation we found that: (1) the dominant factors for NPP in arid areas of middle latitude were moisture and elevation; (2) correlation analysis indicated that the annual average temperature, annual average precipitation, aridity, humidity index, elevation, and slope showed significant correlation with NPP ($P < 0.01$) and, additionally, there were some correlations among the environmental factors; (3) under different environmental temperatures, the effect of the driving ability of the environmental factors on NPP was different: when the average annual temperature was below 0 °C, NPP was driven by elevation ($P < 0.01$); when it

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31500343)

收稿日期: 2018-09-21; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13999165131@163.com

was above 0 °C, NPP was driven by moisture factors ($P < 0.01$); (4) there were significant differences in NPP driving factors between different vegetation and soil types; (5) the NPP value first increased, and then decreased with rising altitude, and altitude had a decisive effect on the driving characteristics of NPP environmental factors. Based on the above conclusions, we revealed the important influence of altitude and the effects of environmental factors on NPP in arid areas of mid-latitudes. Furthermore, the effects of the driving force of altitude on NPP needs further exploration.

Key Words: arid area; NPP; altitude; factor contribution rate; driving force

NPP 是植被净初级生产力(Net primary productivity)的英文缩写,解释为:单位时间与单位面积中绿色植物光合作用产生的有机物质总量减去自养呼吸所消耗的部分。NPP 能初步反映地区生态系统生产能力、生态系统稳定性和自我修复与重建能力^[1]。近年来,许多学者发现全球范围内多地气候变化剧烈,对区域 NPP 变化产生一定影响,随着 NPP 时空变化得加剧,它也正影响着生态系统动植物的生存与演变^[2-4]。然而,在我国环境条件相对恶劣的西北干旱区,气候变化对该区域 NPP 和脆弱生态系统所产生的影响仍是未知。

目前,关于 NPP 的研究热点有:对 NPP 的间接估算,气候因子对其作用机制研究,以及 NPP 与全球碳循环间的内在关系的研究^[5-6]。高分辨率遥感数据可快速真实地反应地表环境变化,利用遥感技术对区域 NPP 进行估算,其模型构建已经相当成熟,随着估算精度的提升,其估算结果得到学术界认可^[7-11]。其中,部分学者利用遥感数据发现近年来中高纬度地区 NPP 呈上升趋势,且各区域对气候变化的响应存在较大的地域差异^[12-13];国内研究者通过 NPP 大尺度空间范围动态监测,优化估算模型,获得中国西南部近几年干旱灾害对 NPP 的影响及作用特点^[14-16];另有国外学者对澳大利亚不同植被区域 NPP 变化趋势分析,从而引出对全球尺度的碳循环作用问题的深入研究^[8]。

近年来,NPP 因子分析研究正逐渐成为生态环境研究中的热点研究内容^[17-18],许多研究者发现 NPP 的主要驱动因素为温度和降水^[19-22]。国内学者也曾就全国尺度的因子分析有少量研究成果,但有关我国中纬度干旱区该脆弱环境下的 NPP 驱动力研究较少。基于以上,本文借助中科院数据平台所提供的大量气候、植被、土壤和海拔地形空间数据,对该数据集做数据整理与分析,使用科学的分析方法,以望更深入地探讨气候、海拔、地形、土壤和植被对 NPP 的作用力及特点。本研究可揭示中纬度干旱区不同属性分区内各环境因子对 NPP 的驱动能力,并获得主要因子对 NPP 的限制特点,为探索中纬度干旱区 NPP 与区域环境因子内在联系提供理论依据。

1 研究区概况

本文研究区位于中国新疆维吾尔自治区伊犁河谷和天山山脉部分区域(图 1),经气象数据计算,全区年均降水量 53.4—501.4 mm,年均气温-19.6—11.7°C,海拔高度 192—5062 m。该区域中部为高原高山气候,上下两端区域为温带大陆性气候;中部为湿润和半湿润区,下垫面以高原草甸和森林为主,两端区域属于干旱和半干旱区,以温带草原和荒漠为主;区域间自然环境差异大,气候差异明显。

该研究区域,气候区域差异显著,地质环境复杂多

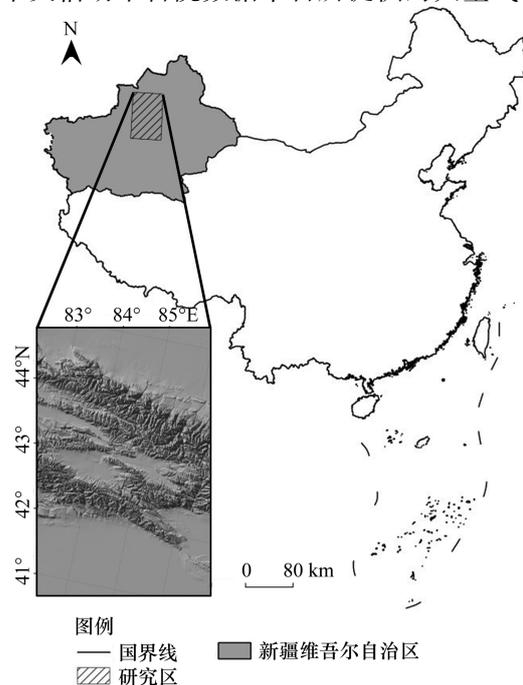


图 1 研究区图

Fig.1 Map of study area

样,海拔变化大,环境差异显著能够较为可观地体现复杂环境下各因子对 NPP 的驱动作用。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文所使用的研究数据有:气候背景、土壤类型、植被类型、时间序列 NPP 和海拔高程栅格影像数据,主要研究数据名称和来源如下表所示(表 1):

表 1 数据来源与数据精度

Table 1 Datasets sources and Datasets accuracy

数据名称 Data name	数据来源 Data sources	数据数量 Quantity	空间分辨率 Spatial resolution/m	空间范围 Spatial range	缩放倍数 Scaling multiplier
数据详情 Data details					
中国 2000-2010NPP 数据	中国科学院资源环境科学数据中心	11	1000	全国	1
中国 100 万植被类型空间分布数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	1000	全国	/
中国土壤类型空间分布数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	1000	全国	/
中国气象背景—年平均气温(经 DEM 校正)数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	500	全国	10
中国气象背景—年平均降水量数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	500	全国	10
中国气象背景— $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温(经 DEM 校正)数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	500	全国	10
中国气象背景—干燥度数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	500	全国	1000
中国气象背景—湿润指数数据	中国科学院资源环境科学数据中心	1	500	全国	100
中国新疆 DEM 高程数据	地理空间数据云	2	100	新疆伊犁河谷部分区域	1
中国新疆 DEM 坡度数据	地理空间数据云	2	100	新疆伊犁河谷部分区域	1
中国新疆 DEM 坡向数据	地理空间数据云	2	100	新疆伊犁河谷部分区域	1

2.2 数据提取

本研究在完成栅格影像数据的收集整理后,使用点属性 Shape 数据图层将数据从单层赋有属性信息的影像中提取出来。为保证被提取数据的有效性,并结合数据空间精度特点。首先,在研究区内创建一个 470×295 (点间实际水平距离 1 km) 的点属性图层,依据该点图层提取 138650 个数据单元,每个数据单元包括 NPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$)、年平均气温($^{\circ}\text{C}$)、年平均降水量(mm)、年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温($^{\circ}\text{C}$)、干燥度、湿润指数、高程(m)、坡度和坡向。随后,将除 NPP 以外的数据均作为环境因子数据,并以表格形式存储,作为本研究的基础(原)数据集,分类后获得植被与土壤类型数据集,数据提取及相关制图在 ArcGIS 9.0 中完成(图 2)。

另外,由于在 138650 数据点中,依据该研究区实际环境条件,NPP 值(2000—2010 年均值)无法服从正态分布,该区域中 NPP 值小于 $500 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ (该区域内 NPP 最大值为 $1048 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$) 的点占总采样点集的 2.17% 左右,NPP 值为 $0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ (包括部分无效值)的采样点占 50.74%。所以,在数理统计分析前需要对数据做一定的筛选与整合。本研究将原数据集整合筛分为两个数据集:数据集 1 (Datasets1),用于研究自然环境因子对 NPP 变化过程的影响,共 6051 个数据点,该数据集中 NPP 值基本服从正态分布(图 3)。

其次,整合出用于研究海拔对 NPP 作用特征分析的数据集 2 (Datasets2),为减小由于海拔造成的环境温度的差异,该数据集以温度为划分界限将 138650 个数据组分为年平均温度 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 、 $-10-0^{\circ}\text{C}$ 、 $0-10^{\circ}\text{C}$ 和

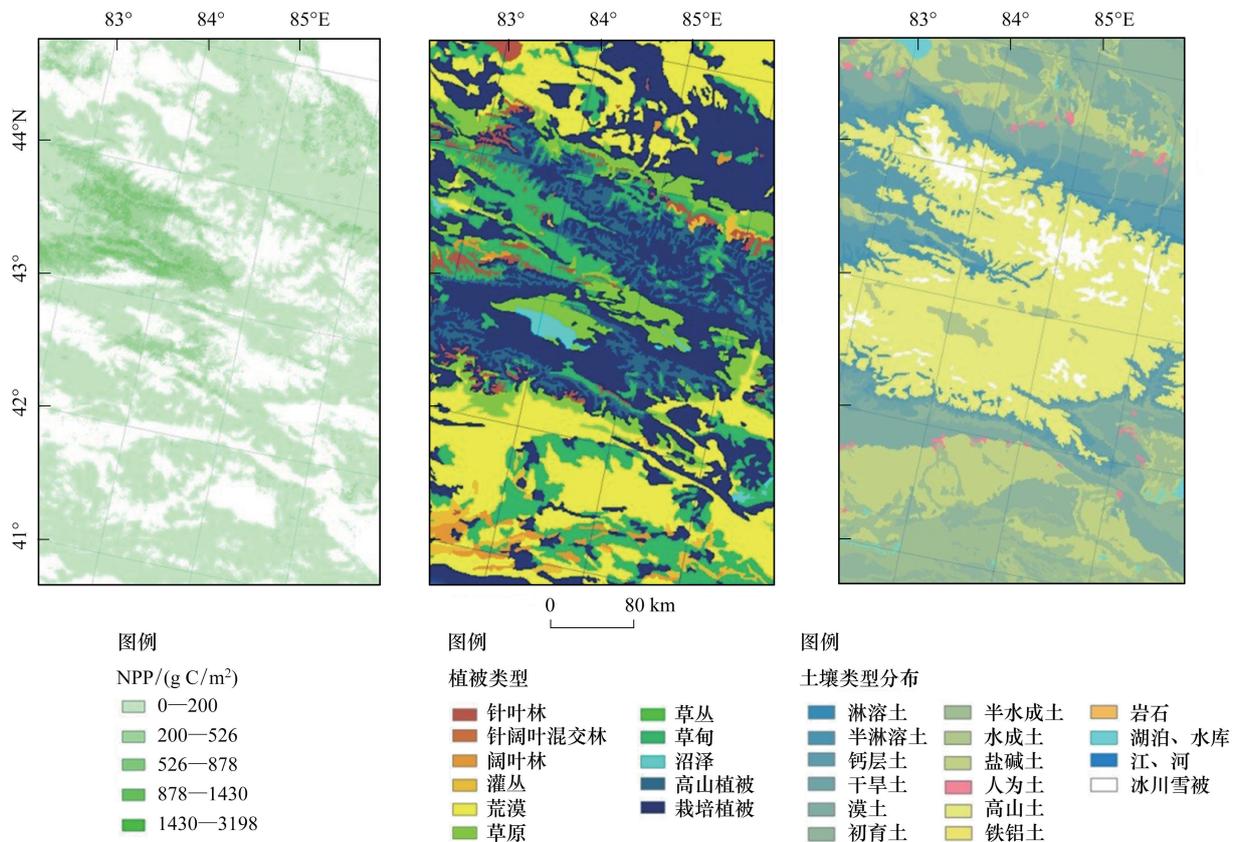


图2 NPP(净初级生产力, primary productivity), 土壤类型和植被类型空间分布状况

Fig 2 Distribution of NPP, soil type and vegetation type

≥ 10 °C 四组, 即分为环境温度相近的 4 组, 记为数据集 2。另有, 以不同土壤类型、植被类型和海拔高度分类处理的数据集 3、4 和 5。

2.3 数据分析

首先, 对原始数据做归一化处理, 解决数据间的量纲不统一问题; 然后, 用标准化后的数据做以 NPP 标准化变量为因变量的逐步回归分析, 获取多个回归方程; 随后, 逐步回归可筛选对因变量作用较强的因子, 依据不同的自由度(自变量数量) 获得多个回归方程, 其方程中排列靠前的因子为权重更高的因子, 从而获得因子间重要性排序, 这也是本研究选择使用逐步回归做线性回归的原因; 最后, 对各因子做相关性分析, 并分析各个因子与 NPP 的相关程度以及各因子间的自相关水平。

另外, 为能探索不同环境均温、土壤类型和植被类

型下 NPP 受各因子驱动的变化规律, 本研究将对数据集 2、3 和 4, (1) 分别做标准化处理, 并以 NPP 标准化变量为因变量做逐步回归分析, 获得不同环境属性下 NPP 与环境因子间的回归方程; (2) 获得不同环境均温、土壤类型和植被类型中各个环境属性下主要驱动因子后, 通过加权计算获得该因子集合中各因子的贡献率, 从而得到具有显著驱动力的 NPP 环境作用因子; (3) 为能发掘和展现海拔因子在中纬度干旱区对 NPP 的作用力, 本文将不同海拔范围内环境数据做基础统计分析, 并在海拔因子与 NPP 间做更深入的模型构建与拟合分

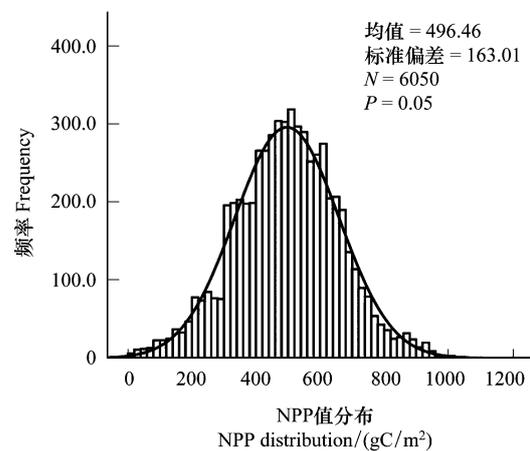


图3 Datasets1 NPP 频率分布图

Fig.3 Datasets 1 NPP frequency distribution map

析。本文所有数理统计分析均在 SPSS 19.0 中完成,另有最优拟合分析使用 1stOpt15 软件完成。

3 结果

3.1 NPP 主要驱动因子

不同纬度地区区域 NPP 的分布特征也存在较大的差异,环境因子对 NPP 的驱动作用巨大,其中气候条件对其作用尤为显著。本研究对 NPP 环境因子驱动力排序分析,结果如下(表 2):

表 2 环境因子与 NPP(净初级生产力, Net primary productivity) 逐步回归方程(Datasets1)

Table 2 Stepwise regression equations of environmental factors and NPP(Datasets1)

模型 Model	R Regression coefficient	R ² R square	调整 R ² Adjusted R ²	SEE Std. Error of the estimate	方程 Equation	均方 Mean square	F F-statistic	P P-Value
1	0.45	0.20	0.20	0.89	$y=0.45X_4$	1247.89	1571.98	0.00
2	0.47	0.22	0.22	0.88	$y=0.47X_4-0.12X_9$	668.13	857.29	0.00
3	0.48	0.23	0.23	0.87	$y=0.71X_4-0.18X_9-0.27X_3$	467.59	608.47	0.00
4	0.48	0.23	0.23	0.87	$y=0.95X_4-0.22X_9-0.44X_3-0.14X_6$	358.19	469.05	0.00
5	0.48	0.23	0.23	0.87	$y=0.88X_4-0.36X_9-0.39X_3+0.11X_5-0.14X_6$	289.18	379.71	0.00
6	0.49	0.24	0.24	0.87	$y=0.89X_4-0.36X_9-0.40X_3+0.11X_5-0.14X_6$ $+0.05X_8$	242.91	319.71	0.00
7	0.49	0.24	0.24	0.87	$y=0.89X_4-0.36X_9-0.40X_3+0.10X_5-0.15X_6$ $+0.05X_8-0.02X_7$	208.72	274.87	0.00

y: NPP 标准化因子, NPP Normalization factor; X₂: 年均气温标准化因子, Normalization factor of annual average temperature; X₃: 年均降水量标准化因子, Normalization factor of annual average precipitation; X₄: 湿润指数标准化因子, Normalization factor of wetness index; X₅: 干燥度标准化因子, Standardization factor of dryness; X₆: ≥10 °C 积温标准化因子, Normalization factor of accumulated temperature at or above 10 °C; X₇: 坡向标准化因子, Slope direction normalization factor; X₈: 坡度标准化因子, Slope normalization factor; X₉: 海拔标准化因子, Altitude normalization factor

由以上方程可知 X₄、X₉、X₃ 对 NPP 有主导作用, 它们对 NPP 的贡献率排序为 X₄>X₉>X₃, 具体分别为: 湿润指数、海拔和年平均降水量, 该结果肯定了水分条件因素对 NPP 的作用, 同时海拔因子对 NPP 的作用也需要得到更多的关注^[12]。随即使用 1stOpt 软件, 以 NPP 为因变量(Z), 湿润指数(X) 和海拔(Y) 为自变量做最优拟合, 在其 900 多个模型中发现最优拟合(R=0.6592) 公式为:

$$Z = \frac{206.62 - 1.87x^2 - 0.02y}{1 - 3.26x + 2.10y} \quad (1)$$

为进一步探索因子间关联性, 对各变量做 Pearson 相关处理结果如下(表 3)。

表 3 环境因子与 NPP 相关性分析

Table 3 Correlation analysis between environmental factors and NPP

相关性 Correlation coefficient	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₁	1.00								
X ₂	0.11**	1.00							
X ₃	0.39**	0.36**	1.00						
X ₄	0.45**	0.09**	0.89**	1.00					
X ₅	-0.29**	-0.04**	-0.31**	-0.57**	1.00				
X ₆	0.02	0.94**	0.10**	-0.13**	0.01	1.00			
X ₇	0.00	-0.02	0.04**	0.05**	-0.04**	-0.02*	1.00		
X ₈	0.04**	-0.32**	0.11**	0.15**	0.02	-0.35**	-0.07**	1.00	
X ₉	-0.07**	-0.89**	-0.10**	0.11**	0.03*	-0.93**	0.01	0.39**	1.00

* : 在 0.05 水平下显著, Significant at 0.05 level; ** : 在 0.01 水平下显著, Significant at 0.01 level

相关性分析中与 NPP 标准化因子存在极显著相关得有： X_2 年平均气温标准化因子、 X_3 年均降水量标准化因子、 X_4 湿润指数标准化因子、 X_5 干燥度标准化因子、 X_8 坡度标准化因子、 X_9 海拔高程标准化因子。其中相关性较大的有 X_3 和 X_4 ，相关系数分别为 0.391 和 0.454。本表格也可发现各环境因子间的相关性，其中 X_3 与 X_4 、 X_2 与 X_6 、 X_2 与 X_9 以及 X_6 与 X_9 相关系数都接近 0.90，相关性极强，他们分别代表降水与湿润指数、平均气温与 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 积温、平均气温与高程以及 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 积温与海拔高程间的相关性。

3.2 不同土壤与植被类型下环境因子对 NPP 的作用特点

在 3.1 中的结果中未能体现温度对 NPP 的作用能力，所以，为能对 NPP 驱动力做更深入地研究，我们使用数据集 2，对不同年均温度区域 NPP 与环境因素做逐步回归分析，预探索各环境因子对 NPP 的驱动特点，结果见表 4。

表 4 中不同年平均气温分组内，各模型的回归拟合度中只有 0—10 $^\circ\text{C}$ 小组中 R^2 较高达到 0.50 其余小组均较小。在年平均气温低于 0 $^\circ\text{C}$ 的环境条件下，驱动 NPP 的第一因子是海拔因子，大于 0 $^\circ\text{C}$ 的环境条件下，第一因子为湿润指数，与 4.1 中结果类似；其中 $\leq -10\text{ }^\circ\text{C}$ 小组中第二因子为湿润指数；在 -10—0 $^\circ\text{C}$ 小组中第二因子为年平均降水量，第三因子为 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 积温；0—10 $^\circ\text{C}$ 小组和 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 小组中第二因子均为干燥指数。回归方程中出现频率较多的因子为海拔高程、湿润指数、年平均降水量和干燥指数。不同年平均温度条件下回归拟合度和第一因子都存在差异，表明我们的分组是一个比较合理的划分，能反映不同年平均气温下各环境因子对 NPP 的作用特点。

其中图 4 贡献率的计算方法为因子系数权重平均法，也就是将一个温度范围的权重记为 1(100%)，小组中包括方程 A、B、C、D 等，使用系数权重法计算各因子权重，后除以小组方程个数，该方法能有效地保证第一因子的重要性。

通过对原始数据集进行了再次整理，建立以植被类型与土壤类型划分的数据集，以 NPP 为因变量，环境因子作自变量做逐步回归分析。数据集预处理同以上分析步骤，结果如表 5 所示。

不同植被和土壤类型下，由因子贡献率可知，主要因子为：年均气温、年均降水、湿润指数和海拔高度。

3.3 海拔因子对 NPP 的驱动特征

不同海拔高度的自然环境存在显著气候条件差异，其中该区域年均温度与降水条件状况如下图(图 5)：

本文使用 1stopt 软件对数据集 1 做拟合分析，以 NPP 为因变量(y)，DEM 高程为自变量(x)，从 3000 多个公式模型中计算分析得到最优拟合度公式结果如下(图 6、表 6)：

以上图表可知海拔与 NPP 间存在较为显著的线性关系，且表现为单峰关系，说明在中纬度干旱区海拔因子对 NPP 的作用较为显著。随后由图 5 可知 NPP 随海拔呈阶段性变化，所以本文继续对海拔 1—1900 m 和海拔高于 1900 m 两组数据，做线性回归获得以下结果(表 7)：由表 7 中高程数据中的坡度与海拔因子系数变化可知，0—1900 m 范围 NPP 与海拔成正相关，而高于 1900 m 区域则呈负相关($P < 0.01$)。

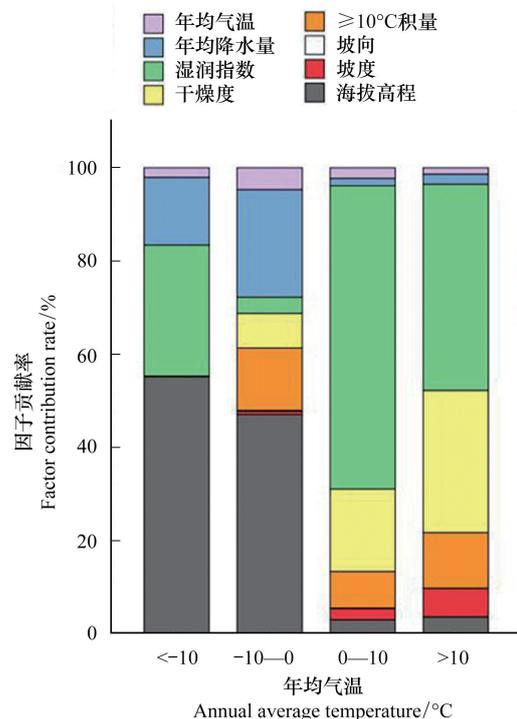


图 4 不同年均温度下各因子贡献率
Fig 4 Factor contribution rate at different annual average temperature

表 4 不同年平均温度下环境因子与 NPP 逐步回归方程 (Datasets 2)
 Table 4 Stepwise regression equation of environmental factor and NPP at different annual average temperature (Datasets 2)

温度范围 Temperature range	模型 Model	R Regression coefficient	R ² R square	调整 R ² Adjusted R ²	S.E.E. Std. Error of the estimate	方程 Equation	均方 Mean square	F F-statistic	P P-Value
≤ -10℃	1	0.12	0.02	0.02	0.99	$y = -0.12X_9$	87.12	88.46	0.00
	2	0.14	0.02	0.02	0.99	$y = -0.13X_9 + 0.07X_4$	56.51	57.64	0.00
	3	0.16	0.03	0.03	0.99	$y = -0.14X_9 + 0.21X_4 - 0.16X_3$	49.71	51.03	0.00
	4	0.17	0.03	0.03	0.99	$y = -0.17X_9 + 0.22X_4 - 0.16X_3 - 0.05X_2$	39.13	40.21	0.00
	1	0.46	0.21	0.21	0.89	$y = -0.46X_9$	8674.88	10998.47	0.00
	2	0.49	0.24	0.24	0.87	$y = -0.44X_9 + 0.17X_3$	4937.15	6500.18	0.00
	3	0.50	0.25	0.25	0.87	$y = -0.34X_9 + 0.22X_3 + 0.15X_6$	3445.54	4604.51	0.00
	4	0.51	0.26	0.26	0.86	$y = -0.34X_9 + 0.20X_3 + 0.21X_6 - 0.11X_5$	2658.61	3587.57	0.00
-10—0℃	5	0.51	0.26	0.26	0.86	$y = -0.31X_9 + 0.21X_3 + 0.18X_6 - 0.11X_5 + 0.08X_2$	2146.52	2905.85	0.00
	6	0.51	0.26	0.26	0.86	$y = -0.30X_9 + 0.30X_3 + 0.16X_6 - 0.12X_5 + 0.10X_2 - 0.11X_4$	1808.45	2457.70	0.00
	7	0.51	0.26	0.26	0.86	$y = -0.31X_9 + 0.29X_3 + 0.15X_6 - 0.13X_5 + 0.11X_2 - 0.10X_4 + 0.03X_8$	1553.53	2112.88	0.00
	8	0.52	0.27	0.27	0.86	$y = -0.31X_9 + 0.29X_3 + 0.15X_6 - 0.13X_5 + 0.11X_2 - 0.10X_4 + 0.03X_8 + 0.02X_7$	1361.86	1853.40	0.00
	1	0.68	0.47	0.47	0.73	$y = 0.68X_4$	30384.87	56826.43	0.00
	2	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.93X_4 + 0.31X_5$	16244.89	32330.15	0.00
	3	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.90X_4 + 0.31X_5 - 0.02X_8$	10841.87	21600.45	0.00
	4	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.90X_4 + 0.30X_5 - 0.07X_8 - 0.08X_6$	8163.08	16326.32	0.00
0—10℃	5	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.90X_4 + 0.32X_5 - 0.06X_8 - 0.15X_6 - 0.08X_9$	6541.37	13104.56	0.00
	6	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.84X_4 + 0.28X_5 - 0.05X_8 - 0.35X_6 - 0.15X_9 + 0.14X_2$	5463.33	10977.40	0.00
	7	0.71	0.50	0.50	0.71	$y = 0.63X_4 + 0.27X_5 - 0.06X_8 - 0.37X_6 - 0.14X_9 + 0.15X_2 + 0.20X_3$	4692.44	9440.85	0.00
	1	0.12	0.02	0.02	0.99	$y = 0.13X_4$	422.11	428.90	0.00
	2	0.18	0.04	0.04	0.98	$y = 0.21X_4 + 0.17X_5$	476.08	493.71	0.00
	3	0.22	0.05	0.05	0.97	$y = 0.28X_4 + 0.26X_5 + 0.15X_6$	463.13	488.59	0.00
	4	0.24	0.06	0.06	0.97	$y = 0.29X_4 + 0.27X_5 + 0.15X_6 - 0.08X_8$	389.21	413.34	0.00
	5	0.25	0.06	0.06	0.97	$y = 0.30X_4 + 0.32X_5 + 0.14X_6 - 0.12X_8 + 0.10X_9$	341.53	364.88	0.00
≥ 10℃	6	0.25	0.06	0.06	0.97	$y = 0.29X_4 + 0.31X_5 + 0.17X_6 - 0.13X_8 + 0.10X_9 - 0.05X_3$	287.81	307.71	0.00
	7	0.25	0.07	0.07	0.97	$y = 0.27X_4 + 0.50X_5 + 0.18X_6 - 0.12X_8 + 0.08X_9 - 0.07X_2 + 0.22X_3$	249.50	266.96	0.00

表 5 不同植被类型与土壤类型下各因子贡献率

Table 5 Contribution rates of different vegetation types and soil types

分类 Classification	模型数量 Model quantity	R Regression coefficient	年均气温 Annual average temperature	年均降水量 Annual average precipitation	湿润指数 Humidity index	干燥度 Aridity index	≥10 °C 积温 Accumulated temperature (at or above 10 °C)	坡向 Aspect	坡度 Slope	海拔 Altitude	因子贡献率 Factor contribution rate/%	
											模型 Model	其他
植被类型 Vegetation type	其他	4	0.69	26.42	19.13	50.46	2.78	46.66	2.79	24.12		
	针叶林	7	0.78	5.57	19.13	50.46	2.78	14.85		2.56	4.64	
	阔叶林	4	0.88	14.61	33.70	38.88					12.80	
	灌丛	6	0.70	22.95	18.15	4.56	1.40	37.78			15.16	
	荒漠	7	0.39	24.60	7.82	29.17	7.30	18.19	1.23		11.69	
	草原	7	0.60	43.61	20.27	15.65	17.39	9.39	1.13	0.74	12.09	
	草甸	7	0.69	22.76	20.27	2.99	3.33	31.87	0.68		18.10	
	沼泽	2	0.67	44.45				55.55				
	高山植被	7	0.49	17.92	24.58	18.31		16.91	2.41		15.40	
	栽培植物	6	0.49	7.99	34.41	43.75		8.19		0.78	4.88	
土壤类型 Soil type	半淋溶土	7	0.78	7.09	19.94	47.57	2.35	8.33		4.14	10.59	
	钙层土	8	0.69	19.37	44.14		5.26	11.91		1.15	18.17	
	干旱土	10	0.46	17.82	38.80		7.49	22.15	4.50	9.24		
	漠土	7	0.43	1.16	39.69	47.79	5.75	2.80	0.45	2.37		
	初育土	4	0.28	28.99	34.44	21.72				14.85		
	本水成土	7	0.66	22.67	14.30	21.83	5.64	11.48	0.00	14.21	9.88	
	水成土	5	0.50	55.30	27.95				16.74			
	盐碱土	7	0.34	19.30		21.48	14.72	22.46	2.96	2.75	16.34	
	人为土	8	0.58	10.37	33.96	29.96	4.72	7.48	1.22	1.90	10.39	
	高山土	8	0.73	5.76	40.47	12.96	5.14	12.55	2.67	2.26	18.18	
湖泊水库	4	0.77	64.91							35.09		
冰川雪盖	4	0.61	21.59			23.24			17.77	37.40		

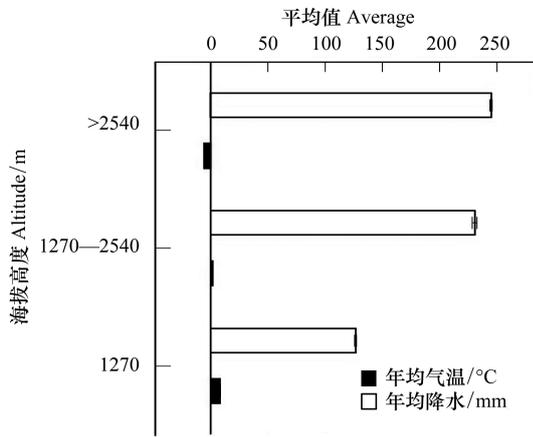


图 5 不同海拔高度年均温度与降水条件

Fig 5 Average annual temperature and precipitation conditions at different altitude

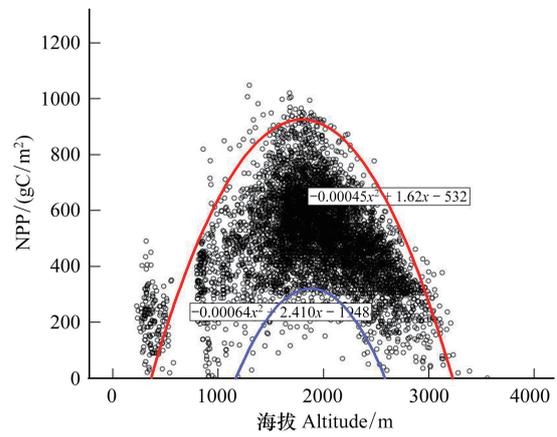


图 6 Datasets1 DEM-NPP 分布

Fig.6 Datasets1 DEM-NPP distribution

表 6 Datasets1 DEM-NPP 最优拟合公式

Table 6 Datasets1 DEM-NPP optimal fitting formula

序号 Order number	最优拟合公式 Optimal fitting formula	R Regression coefficient
1	$y = Sqr((12.61 + 9.28x^2)/(1 + 1.87x^2))$	0.6114
2	$y = Sqr(11.63/(1 + 1.61x^2))$	0.6110
3	$y = -502.88 + 3.63x^{0.5} + 16.35x - 1.71x^{1.5} + 0.07x^2 + 1.64x^3 - 6.53x^{3.5}$	0.6101
4	$y = 159388.48 - 1865.17Ln(x) + 7381.72(Ln(x))^2 - 6183.10(Ln(x))^3 - 6221.49(Ln(x))^4 + 4151.70(Ln(x))^5 - 916.82(Ln(x))^6 + 83.26(Ln(x))^7 - 0.78(Ln(x))^8 - 0.34(Ln(x))^9 + 0.01(Ln(x))^{10}$	0.6100
5	$y = 305.62 + 0.27x^{0.5} + 1.18x - 0.24x^{1.5} + 0.01x^2 + 1.71x^3$	0.6099
6	$y = -2781.36 + 577.48x^{0.5} - 42.11x + 1.43x^{1.5} - 0.02x^2$	0.6099

表 7 不同高程范围 NPP-DEM 回归分析

Table 7 NPP-DEM regression analysis of different elevation ranges

海拔分组 Altitude	R Regression coefficient	R ² R square	调整 R ² Adjusted R ²	模型 Model	P P-Value
0—1900 m	0.631	0.399	0.397	$y = 616.17 - 0.76X_1 - 0.05X_2 + 0.11X_3 - 0.07X_6 + 1.32X_7 + 0.16X_8$	<0.01
>1900 m	0.707	0.491	0.490	$y = 1446.3 - 2.00X_1 - 0.05X_2 + 0.13X_3 + 0.01X_5 - 1.19X_7 - 0.30X_8$	<0.01

4 讨论

4.1 NPP 的主要驱动力

气候变化对 NPP 的影响十分显著^[23],适宜的气温与降水条件能为 NPP 的增长提供更大空间,本研究结果表明 NPP 第一驱动因子是湿润指数,第二驱动因子为海拔因子,多数研究者认为水分因子是对 NPP 作用最强的因子^[24],本研究与其他研究者的结果相似。NPP 为绿色植被净有机物生产量,植被的生长状况能间接地反映 NPP 水平^[25]。植物健康生长需要良好的光合作用条件,与之直接相关的环境因素包括:温度、水分和光照条件,这些因子均与海拔因素有较强的相关性^[26]。海拔因子对干旱区 NPP 有显著的驱动作用,其原因

在于:在干旱区,地形的分布变化塑造了其长久以来的环境气候条件。干旱的环境背景下,大型山麓控制了水汽的活动,进而控制地表水源的分布,使得该区域地表环境变化对地形的依赖程度较高,最终作用于 NPP^[27]。在该区域 NPP 随海拔的变化可由图 6 直观地展现,随海拔的上升 NPP 最大值和最小值均,均先增大后减小,在海拔 1900 m 左右出现一个分界高度,整体呈带状浮动(区间)变化。

4.2 环境温度对 NPP 的作用

区域地表生态系统生产力受环境温度的直接影响^[28],本研究中分析结果发现,0℃以上区域水分因子对 NPP 的驱动能力占主导地位,而 0℃以下主导因子则为海拔,说明不同环境温度下 NPP 受环境因子作用效果与机制产生了相应变化,即相同区位内不同环境属性下 NPP 的主导影响因子存在差异。主要驱动因素发生了转变,证明初级生产力在不同区域温度下,有不同的发展模式,出现这种现象的原因可能是由该环境下的特定植被类型分布所导致的,或是不同温度环境下植物自然生产速率的变化导致的,还有待进一步研究^[29]。其次,零上与零下环境是许多生命活动的分界线,水分在零下环境很可能成为固态或半固态,水分在植物体内的传输受到阻碍,间接阻止了能量与养分在起体内的输送,没有水分的参与许多生物化学反应无法完成,从而导致植被的正常生理活动受到胁迫^[30]。且在本研究中还发现四组温度梯度中,0—10℃环境温度下环境因子与 NPP 间建立的线性模型具有相对较高的拟合度,说明在不同温度范围内各环境因子对 NPP 的作用能力是存在差异的,且线性模型不能完整地表达各因子与其复杂的内在联系。此外我们还发现 NPP 与海拔高度是负相关关系。可推论,随海拔的上升初级生产力累积量随之减少。随海拔的不断攀升,第一生产者有机质生物消耗量大于生物生产累积量,所以 NPP 与海拔高度呈负相关^[31-32]。对数据集 2 的分析我们发现在不同年均气温下,各个因子的贡献率呈现趋势性变化。该结果一定程度上肯定了温度对 NPP 的作用力,另外发现,在干旱区零下温度环境中,海拔因子拥有更强的驱动能力。

4.3 不同土壤与植被类型下 NPP 主要驱动因子

由水分主导发展的干旱区海拔跨度大,地形复杂,生态位十分丰富,植被与土壤类型多样。植被类型区划对 NPP 分布变化有巨大影响,NPP 的计算也来源于植被生物量估算模型,不同植被拥有不同的生态位和生理特点,其外形的高大与低矮、分布特征和对生存环境的耐受能力等,都有较大差异,这些差异必然在 NPP 中得到体现^[33]。由表 5 中的因子贡献率结果可知,不同植被类型与土壤类型间 NPP 驱动因子存在明显差异。经过逐步回归因子剔除后,差异更为显著,该结果较为详细地揭示了不同植被与土壤类型条件下各因子对 NPP 的驱动能力。植被类型间的差异会间接影响 NPP,多数植物的物候变化虽然大致相近,但仍有差异存在。且不同植物间各器官的生长发育在外形和结构也有很大差异,例如开花果实植物与根茎果实植物在果实形成与构造上的差异;另外,植物死亡与衰败的过程也有不同,例如植物的立枯和伏枯现象^[34]。总之,不同植物类型生产有机质的机理与构造存在差异,从而间接地在 NPP 中有所体现。本文对不同植被类型分组处理,通过量化分析证明:不同植被根据自身生理活动与生存环境特点 NPP 主要驱动因子有较大差异,总体表现为,乔木区较灌木区而言对水分的依赖更强,而灌木区则对温度的依赖性更强。

植物是 NPP 的最主要贡献者,生存环境塑造了其生长繁殖模式,植物所需的营养成分和水分都来自土壤,土壤的质地与类型对 NPP 有显著的作用力,例如盐渍地中很少有高大茂密的植物生长,地表常为裸地或稀疏的耐盐灌丛植物,所以 NPP 相对较低^[35-36]。另外,不同的土壤质地和类型,间接地影响了土壤对植物的养分供给能力,进而对 NPP 有所影响。本文使用不同土壤类型数据集做逐步回归分析,结果表明不同的土壤类型间驱动因子存在较大差异,但温度与降水仍占主导地位。在干旱区,地表与地下水分的转移与分配受土壤属性影响,不同区域间土壤类型的差异在 NPP 中得到体现^[35]。

5 结论与展望

本文收集新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域内各气候与地形因子数据,用于分析 NPP 环境主要贡献因子,以望探求干旱区其特殊的地理与生态环境下,NPP 驱动因子类型与贡献能力。研究过程中为能更为深入

地研究不同环境背景下主要贡献因子的驱动特点,本文以不同年均气温、土壤类型、植被类型和海拔高度对原始数据做分类处理,分别研究,得出以下结论:

(1)我国西北部干旱区 NPP 的主导因子为水分因素和高程因素以及与该两个因素相关性较强的因子。

(2)相关分析中得出,年平均气温、年平均降水量、干燥度、湿润指数、高程和坡度与 NPP 有显著相关性 ($P < 0.01$)。各环境因子间也存在一定相关性。

(3)不同环境温度下,海拔因子对 NPP 的影响有差异,0 °C 以下区域海拔因子对 NPP 贡献率更高,而高于 0 °C 区域水分因子的贡献率更高。

(4)不同植被类型与土壤类型间 NPP 主要贡献因子及贡献率差异显著 ($P < 0.01$)。

(5)NPP 随海拔的升高先增大后减小,海拔高度对 NPP 环境因子驱动特点起到决定性作用。

中纬度干旱区以水资源主导演变的下垫面环境,拥有其自身特殊的地质构造过程与生态环境特点,本文详细地阐释了各因子对 NPP 的作用特点,对干旱区生态系统环境变化研究和生态系统物质平衡研究有较大的参考价值。另外,本文仍存在一些不足,本文主要数据来源为产品影像数值提取,虽选择了更能客观体现各因子驱动作用的研究区,但 NPP 的分布需要人工筛选使其满足正态分布,供因子分析使用,在此过程中可能对研究结果有所影响。使用间距 1 km 的点图层提取数据集,影像的空间分辨率与提取密度仍有待提升,且原始影像由二次插值获得,理论数值与实际值间存在一定差距。本研究发现该中纬度干旱区海拔因素对 NPP 的驱动研究还可拓展深入,例如探索不同海拔区域 NPP 对其地表变化过程的反馈,以及对不同海拔地表植物物种多样性对 NPP 的作用等,拥有巨大研究潜力。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所为本研究提供原始数据与相关技术支持。

参考文献 (References):

- [1] Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the Biosphere. New York: Springer, 1975.
- [2] Horion S, Cornet Y, Erpicum M, Tychon B. Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 20: 20-32.
- [3] Brouwers N C, Mercer J, Lyons T, Poot P, Veneklaas E, Hardy G. Climate and landscape drivers of tree decline in a Mediterranean ecoregion. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(1): 67-79.
- [4] Wang S Y, Zhang B, Yang Q C, Chen G S, Yang B J, Lu L L, Shen M, Peng Y Y. Responses of net primary productivity to phenological dynamics in the Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 235-246.
- [5] 张芳,熊黑钢,冯娟,许仲林.基于遥感的新疆人工绿洲扩张中植被净初级生产力动态变化. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 194-200.
- [6] 李传华,赵军.2000—2010年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 712-718.
- [7] Sun R, Zhu Q J. Estimation of net primary productivity in China using remote sensing data. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 11(1): 14-23.
- [8] Brouwers N C, Coops N C. Decreasing Net Primary Production in forest and shrub vegetation across Southwest Australia. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 10-19.
- [9] Tum M, Zeidler J N, Günther K P, Esch T. Global NPP and straw bioenergy trends for 2000-2014. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 90: 230-236.
- [10] Gang C C, Zhang Y Z, Wang Z Q, Chen Y Z, Yang Y, Li J L, Cheng J M, Qi J G, Odeh I. Modeling the dynamics of distribution, extent, and NPP of global terrestrial ecosystems in response to future climate change. *Global and Planetary Change*, 2017, 148: 153-165.
- [11] 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 181-189.
- [12] 施红霞,王澄海.21世纪北半球中高纬度净初级生产力(NPP)变化及其与气候因子之间的关系. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 327-335.
- [13] 王强,张廷斌,易桂花,陈田田,别小娟,何奕萱.横断山区 2004-2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [14] 赵志平,吴晓蕾,李果,李俊生.2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响. *生态学报*, 2015, 35(2): 350-360.
- [15] Eisfelder C, Klein I, Bekkulyeva A, Kuenzer C, Buchroithner M F, Dech S. Above-ground biomass estimation based on NPP time-series -a novel approach for biomass estimation in semi-arid Kazakhstan. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 13-22.

- [16] Lu D S. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(7): 1297-1328.
- [17] Liang T G, Feng Q S, Cao J J, Xie H J, Lin H L, Zhao J, Ren J Z. Changes in global potential vegetation distributions from 1911 to 2000 as simulated by the comprehensive sequential classification system approach. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 1298-1310.
- [18] 杨会巾, 刘丽娟, 马金龙, 王进, 李小明. 基于 Landsat 8 遥感影像反演干旱区净初级生产力的尺度效应. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1294-1300.
- [19] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例. *地理学报*, 2016, 71(1): 35-48.
- [20] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [21] 吴艳艳. 城市化过程广州土地覆盖变化对净初级生产力格局的影响[D]. 广州: 中山大学, 2016.
- [22] 刘夏. 气候变化对三江平原沼泽湿地 NPP 的影响研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [23] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 田国良. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1546-1553.
- [24] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 陈奕兆, 张艳珍, 李建龙, 程积民. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应. *草业学报*, 2016, 25(11): 1-14.
- [25] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.
- [26] 张静, 任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因. *生态学报*, 2016, 36(23): 7667-7677.
- [27] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982-2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [28] 段金龙, 张学雷. 区域地表水体、归一化植被指数与热环境多样性格局的关联分析. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2812-2820.
- [29] 智海, 丹利, 俞永强, 徐永福, 王盘兴. 东亚地区陆地植被净初级生产力与夏季气候的模拟. *气象学报*, 2009, 67(6): 1032-1044.
- [30] 蒋冲, 王文丽, 陈爱芳, 李建国, 王飞, 穆兴民, 李锐. 近 52 年渭河流域气候变化对植被净第一性生产力的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 952-957.
- [31] Zhang M L, Lal R, Zhao Y Y, Jiang W L, Chen Q G. Estimating net primary production of natural grassland and its spatio-temporal distribution in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 184-195.
- [32] Sun C M, Zhong X C, Chen C, Gu T, Chen W. Evaluating the grassland net primary productivity of southern China from 2000 to 2011 using a new climate productivity model. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(7): 1638-1644.
- [33] 徐继填, 陈百明, 张雪芹. 中国生态系统生产力区划. *地理学报*, 2001, 56(4): 401-408.
- [34] 张向茹, 程曼, 祝飞华, 安韶山. 宁南山区半干旱草原典型植物立枯物的碳矿化特征. *草地学报*, 2014, 22(2): 277-282.
- [35] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 杨昊天. 固沙植被区土壤呼吸对反复干湿交替的响应. *生态学报*, 2015, 35(20): 6720-6727.
- [36] Yang Y, Wang Z Q, Li J L, Gang C C, Zhang Y Z, Zhang Y, Odeh I, Qi J G. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 164-172.