

2008—2014年植被覆盖变化对黑河流域 净初级生产力的影响研究

宋艺¹, 李小军², 江涛^{1,3}

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 3. 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 土地利用/覆被变化是生态系统能量流动与物质循环的主要驱动力之一, 土地利用/覆被变化最直观的表现就是植被覆盖度的变化, 研究其对植被净初级生产力的影响, 对区域土地利用的管理具有重要意义。研究利用 MODIS 反射率及 NPP 数据, 分析了 2008—2014 年黑河流域植被覆盖度变化及其对 NPP 的影响。结果表明: (1) 2008—2014 年, 黑河流域年均 NPP 呈现上升的趋势, 流域 NPP 总体呈现南多北少, 上游地区的祁连山地带、中游地区的张掖、酒泉、临泽等地 NPP 值普遍较高, 除沿河道外, 下游 NPP 值普遍较低, 并且在下游的北部地区 NPP 值达到了最低。(2) 相比 2008 年、2014 年黑河流域 I 级(盖度小于 20%)、IV 级(盖度介于 40%~60%)和 V 级(盖度大于 60%)植被覆盖等级所占比例有所上升, 而 II 级(盖度介于 20%~30%)和 III 级(盖度介于 30%~40%)比例下降, 影响该流域植被生长的主导性因子不同, 上游地区主要受降水影响, 下游受气温影响较大。(3) 植被覆盖度对 NPP 的产量具有很好的指示作用, 二者的决定系数高达 0.90, NPP 产量随植被覆盖度的增大而增加。(4) 2008—2014 年, 黑河流域 NPP 总量由 6 052.82 GgC/a 增加为 6 624.54 GgC/a, 增加幅度为 9.45%, 其中, 面积减少 17 086 km² 的低植被覆盖区 NPP 总量减少仅为 25.65 GgC/a, 而高植被覆盖度区增加最多, 从 2 861.96 GgC/a 增加为 3 206.86 GgC/a, 增加量为 344.90 GgC/a, 较高植被覆盖度区的 NPP 总量增加次多, 增加了 251.84 GgC/a, 增幅为 12.57%。

关键词: 黑河流域; 净初级生产力(NPP); 植被覆盖度; 遥感; MODIS

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0204-06

Effects of Vegetation Coverage Change on Net Primary Productivity of Heihe River Basin During 2008—2014

SONG Yi¹, LI Xiaojun², JIANG Tao^{1,3}

(1. College of Geomatics, Shan Dong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, State Bureau of Surveying and Mapping, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Land use and cover change (LUCC) is one of the main factors that affect material circulations and energy flows in ecosystems. The change of vegetation coverage can reflect the LUCC, studies on how vegetation coverage change influences net primary productivity (NPP) are necessary for science-based planning of regional land use. Based on data of MODIS-Reflectance and MODIS-NPP from 2008 to 2014, the impacts of vegetation coverage change on NPP in Heihe River Basin were assessed. The main findings are: (1) the vegetation coverage in Heihe River Basin got the rise trend in 2008—2014; spatially, NPP on the south side of the river was more than that on the north side, and the NPP on Qilian Mountains and Zhangye City, Jiuquan City, Linze City were higher as compared to downstream area, and the NPP value reached the lowest in the northern downstream area; (2) compared to 2008, vegetation coverage of grade 1 (coverage below 20%),

grade 4(coverage between 40% and 60%), and grade 5(coverage above 60%) got the rise, while grade 2(coverage between 20% and 30%) and grade 3(coverage between 30% and 40%) got the reduction in 2014; (3) correlation-analysis showed that the vegetation coverage had the good indication of NPP, i. e., the correlation coefficient is more than 0.90; (4) during the period from 2008 to 2014, regional annual primary production increased from 6 052.82 GgC/a to 6 624.54 GgC/a, with the increase of 9.45%; the area of vegetation coverage of grade 1 decreased by 17 086 km², but the total NPP only decreased 25.65 GgC/a; vegetation coverage of grade 5 increased most, and total NPP increased from 2861.96 GgC/a to 3 206.86 GgC/a, with an increase of 344.90 GgC/a(i. e. 12.05%), while Vegetation coverage of grade 4 increased 251.84 GgC/a.

Keywords: Heihe River Basin; Net primary productivity (NPP); vegetation coverage; remote sensing; MODIS

陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)作为地表碳循环的重要组成部分,不仅反映了绿色植被在自然环境下的生产能力,而且还是判定生态系统碳汇和调节生态过程的重要因子^[1],它是指植物单位时间和单位面积由光合作用产生的有机物中扣除自养呼吸后的剩余部分^[2-5],表征了生态系统的质量状况。土地利用/覆被(LUCC)变化会改变地表覆被状况,不同土地利用类型因植被覆盖类型、密度间的差异而导致 NPP 的产量不同,进而影响整个陆地生态系统的碳储量和碳循环^[6]。NPP 对 LUCC 变化的响应研究已有很多^[6-9],王宗明等^[7]对 2000—2005 年三江平原 LUCC 变化对植被 NPP 的影响进行了研究,表明 5 a 间三江平原沼泽湿地平均 NPP 下降 7.8%,耕地、草地、林地等均呈下降趋势,LUCC 变化直接导致了该区域 NPP 的降低。王翠翠等^[8]分析了 2000—2010 武汉城市扩张对植被 NPP 的影响,表明武汉市建设用地面积增加 57.88%,导致区域 NPP 下降了 18.10%。王原等^[9]对上海市气候和 LUCC 变化对农田 NPP 的影响进行了研究,表明城市化导致大量农田被占用,1984—2004 年 LUCC 变化对农田 NPP 的影响增加了 14%。

近 50 a 以来,黑河流域大兴水利,开垦荒地,人类活动的加剧,导致流域内的 LUCC 发生巨大变化,生态环境退化严重,上游地区主要表现为天然林减少,草地沙化日益严重,生物量减少,冰川面积减小;中游地区土壤次生盐碱化和沙漠化严重;下游地区天然绿洲逐渐萎缩、湖泊消失、土地沙漠化持续扩展,整个流域生态环境较为脆弱^[10-11],对其 NPP 的研究是监测黑河流域生态系统健康状况的重要手段,具有重要的现实意义。国内学者针对黑河流域 NPP 估算方法、NPP 变化特征以及影响 NPP 变化的气候特征等方面开展的工作较多^[11-12],但对于从植被覆盖度角度定量评估不同植被覆盖等级变化引起的区域 NPP 变化鲜有报道。基于此本文利用 MODIS 提供的反射率数据,计算黑河流域不同年份的植被覆盖度,并结

合 MODIS NPP 数据,研究植被覆盖度变化对区域植被 NPP 的影响,从而丰富黑河流域环境变化研究成果,可为黑河流域的土地利用管理、生态环境保护提供理论决策依据。

1 研究区概况

黑河流域(37°41′—42°42′N,96°42′—102°00′E)是我国西北干旱地区第二大内陆河流,流长 821 km,流域面积约 14.29 万 km²,地处欧亚大陆中部,属于温带大陆性气候,春季多风、夏季高温干热、冬季严寒,太阳辐射强烈,日照充足,昼夜温差大,降水稀少而集中。流域地势南高北低,按照自然地理特点和海拔高度分为上游祁连山地、中游走廊平原和下游阿拉善高原 3 个地貌类型区^[13]。上游景观垂直分异明显,年降水量 300~500 mm,海拔多在 2 000 m 以上,覆盖有灌丛草甸、冰川、森林、草甸草原;中部河西走廊区年降水量 100~250 mm,海拔多介于 1 000~2 000 m,区域景观大多以人工农田、草地、林地为主;下游的额济纳旗绿洲年降水量不足 45 mm^[14],属荒漠极干旱区,分布着大面积的沙漠和戈壁,植被多以红柳、胡杨、沙枣、怪柳为主,植被种类简单且覆盖度小^[15-16]。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源及处理

MODIS(中分辨率成像光谱仪)是搭载在 Aqua 和 Terra 上的重要传感器,具有 36 个光谱通道,分布在可见光、近红外到热红外波谱范围内,因其重访周期短、数据质量高的特点,已经被广泛应用到全球气候变化、资源环境监测等多个方面,本文用到的数据主要是 MODIS 提供的 Level 3 级地表反射率产品 MOD09A1 和 Level 4 级 NPP 产品 MOD17A3,这两种产品均可通过 NASA 官网进行免费下载(<https://eosweb.larc.nasa.gov/>)。MOD09A1 数据集除包含红、绿、蓝等 7 个波段的反射率数据外,还包含质量控制(Quality Control)、观测天顶角(View Zenith)在

内的 13 个数据,其空间分辨率为 500 m,是由 8 d 之内 L2G 观测数据选取质量最优像元合成而来,其中 QC 图层是 32 位二进制数据,位数 0~1 是反射率产品质量的主要表征因素,00 表示所有波段质量最理想的像元,10 表示所有波段受云影响的像元,具体可参看其产品用户手册。MOD17A3 数据空间分辨率为 1 km,它是利用光能利用率模型和 BIOME-BGC 模型估算的全球陆地生态系统的年 NPP,具有较好的精度^[17]。为覆盖整个黑河流域,需要两轨数据,轨道号分别为 h25v04, h25v05,四个年份共获取 368 景 MOD09 A1, 8 景 MOD17 A3。

虽然 MOD09A1 已完成对气体、卷云及气溶胶的大气校正,但臭氧、云、灰尘和其他气溶胶仍然会引起噪声,会对遥感指数计算结果的准确度产生影响。为此,本文根据 MOD09A1 提供的 QC 文件进行如下质量控制(图 1),文中涉及的数据处理主要包括地表反射率数据的投影变换、数据提取、镶嵌以及裁切等。为保证投影信息一致,将上述数据的投影统一转换为 Albers 投影,统一像元大小为 1 000 m。图中,NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 表示归一化植被指数,虚线框内共循环 92 次,每一幅影像只使用所有波段质量最理想的像元求取 NDVI,对 NDVI 求和,并记录求和次数,最后二者求商,即可获得该年份的平均 NDVI,整个质量控制过程在 IDL 语言下实现。

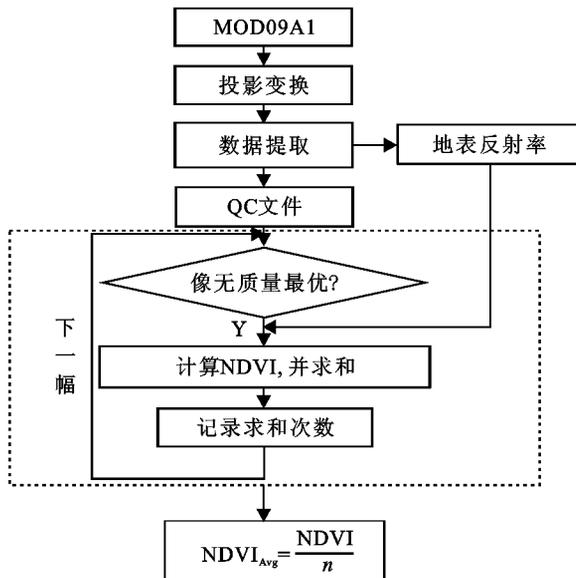


图 1 NDVI 年平均合成过程

2.2 植被覆盖度的计算

NDVI 是遥感中一个非常重要的参数,它能够反映植被覆盖度、生物量和叶绿素含量等生物物理化学性质,已被众多学者广泛的应用到土地覆盖变化研究中^[18]。计算公式如下:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{Red}}} \quad (1)$$

式中: R_{Red} 和 R_{NIR} , 分别代表近红外和红光波段的反射率,对应 MOD09 A1 中的第 1 和第 2 波段。

植被覆盖度反映了植物生长的茂盛程度,常被用于进行植被生长趋势和生长状态的研究^[19],它与 NDVI 之间存在显著的相关关系,通常可以用 NDVI 直接提取植被覆盖度。混合像元分解模型是人们用来计算植被覆盖度的最基本方法,其中最常用的线性模型是像元二分模型,它的基本原理如下:假设一个像元由植被和土壤两部分组成,则像元信息 S 可以用土壤贡献的信息(记为 S_s)与植被贡献的信息(记为 S_v)加权求和得到,即:

$$S = S_v + S_s = f_{\text{veg}} \cdot S_{\text{veg}} + (1 - f_{\text{veg}}) \cdot S_{\text{soil}} \quad (2)$$

式中: f_{veg} 表示植被覆盖度; S_{veg} 为纯植被覆盖信息; S_{soil} 为纯土壤覆盖信息,将 NDVI 与像元二分模型结合即得到基于 NDVI 的植被覆盖度像元二分模型^[19]:

$$f_{\text{veg}} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (3)$$

式中: NDVI_{veg} 为纯植被覆盖像元的最大值,理论上趋于 1; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯土壤像元的最小值,理论上趋于 0。实际中由于土壤粗糙度、植被类型分布、气候差异等因素的影响,不同地区的 NDVI_{veg} 和 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 会存在差异^[20]。

采用数据处理过程得到的年平均 NDVI 数据作为基础数据,参考 Gutman 等^[21]的方法,选取一定置信度区间的最大值和最小值。根据整幅 NDVI 图像的灰度分布,将 NDVI 数值最大的 0.5% 区域作平均值,得到 NDVI_{veg} ,将 NDVI 数值最小的 0.5% 区域作平均值,得到 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$,通过公式(3)计算每年的植被覆盖度,并按照低植被覆盖度($f_{\text{veg}} < 20\%$)、较低植被覆盖度($20\% \leq f_{\text{veg}} < 30\%$)、中度植被覆盖度($30\% \leq f_{\text{veg}} < 40\%$)、较高植被覆盖度($40\% \leq f_{\text{veg}} < 60\%$)和高植被覆盖度($f_{\text{veg}} \geq 60\%$)的标准进行植被覆盖度分级,分别记为 I, II, III, IV 和 V。

3 结果与分析

3.1 黑河流域 NPP 的时空分布特征

虽然不同年份黑河流域 NPP 空间分布存在差异(图 2),但仍存在一定共同特征:NPP 总体上呈现南多北少,其年平均值的范围处于 0~600 gC/m²,在上游地区的祁连山地带、中游地区的张掖、酒泉、临泽等地 NPP 值普遍较高,分析认为是由于上游山区的南部和东南部多为自然林地覆盖,而中游的河西走廊平原多为人工绿洲,植被覆盖度较高导致。下游除沿河的少量绿洲外,其他广阔的区域覆盖有大面积的戈壁

和荒漠致 NPP 值普遍较低,并且在下游的北部地区 NPP 值达到了最低。

年际变化上,黑河流域 NPP 均值的最低值为 2008 年的 $42.25 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最高值为 2012 年的 $46.83 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,整个流域 NPP 均值呈现上升的趋势(表 1),说明黑河流域植被覆盖及其生态系统的能量输入水平总体上有所改善和提高,从而也说明该流域的生态环境有所好转^[11]。不同年份流域 NPP 的最大差值分别为 552.30,501.00,552.20,560.50 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,NPP 的标准差分别为 87.47,89.23,95.55,94.85,这两个统计指标反映 4 个年份 NPP 的变化幅度,即 2012 年、2014 年变化幅度较大、2008 年、2010 年变化幅度较小。

表 1 不同年份的 NPP 统计数据

年份	$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$			
	最小值	最大值	均值	标准差
2008	0	552.30	42.25	87.47
2010	0	501.00	44.04	89.23
2012	0	552.20	46.83	95.55
2014	0	560.50	46.24	94.85

的肃南县和下游的额济纳旗等区域,NPP 增加超过 $30 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域主要分布在上游的祁连中部、中游的张掖、临泽、高台等植被覆盖程度较好的区域。

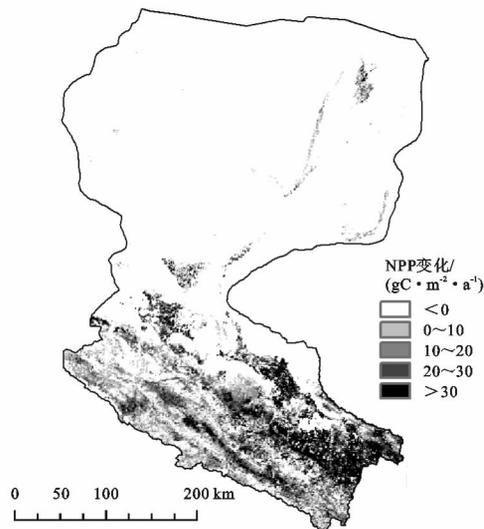


图 3 黑河流域 2014 年、2008 年 NPP 差值空间变化

3.2 黑河流域植被覆盖度的变化

黑河流域植被覆盖度空间分布存在一定的特征,由图 4 可知,低植被覆盖度的区域主要分布在黑河流域上游祁连海拔较高的地区、中游金塔县东北部、下游额济纳旗的西部、南部以及东南部,这些地区覆盖有积雪、戈壁或者沙漠,因而植被覆盖度低。较低植被覆盖区主要分布在黑河流域下游的西部,中等植被覆盖度区主要分布在肃南县北部和上游山丹县,较高植被覆盖区主要分布在上游民乐县、祁连西北部以及金塔县,这些区域土地覆盖类型以人工栽培植被和草甸植被为主^[11],高植被覆盖区则分布在祁连县、中游等流量比较大的地区,两个年份均表现出从上游至下游沿着河道低植被覆盖区越来越大,这是由于中上游地区对河水截流引起的,从上至下流量越来越少,进而影响了河岸两侧植被的生长,因此植被覆盖度越来越低。

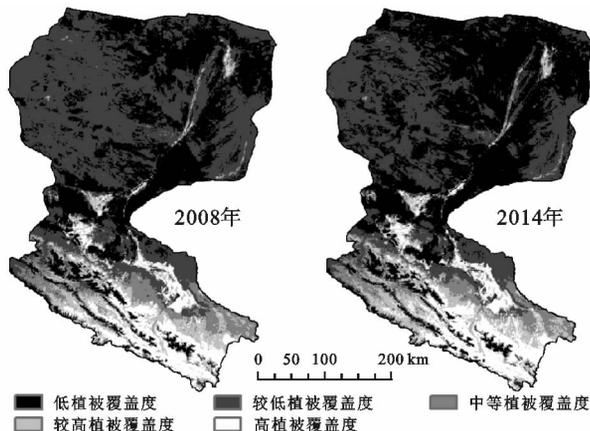


图 4 2008 年、2014 年黑河流域植被覆盖度

不同年份黑河流域植被覆盖度之间存在差异。由

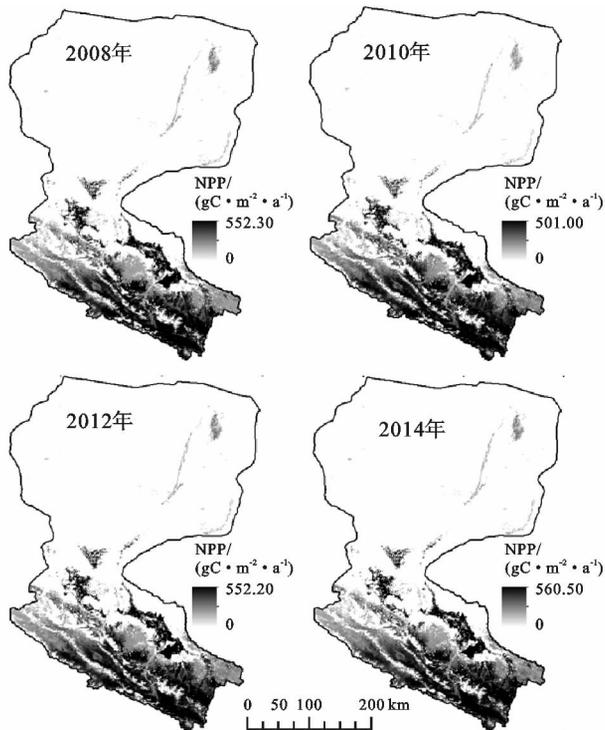


图 2 黑河流域不同年份的 NPP 空间变化

空间分布变化上,通过计算黑河流域 2014 与 2008 年 NPP 之间的差值,得到整个流域的 NPP 变化值,并对其进行分级(图 3),NPP 不变或者减少的区域主要分布在黑河下游的戈壁和荒漠地区、嘉峪关等地,这些地区 NPP 均值较小,因而波动也较小,NPP 增加范围在 $0 \sim 10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $10 \sim 20 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域主要分布在祁连的东北部地区、上游

图 4、表 2 可知,相比 2008 年、2014 年 I、IV 和 V 级植被覆盖等级所占比例有所上升,低植被覆盖度区的面积由 45 504 km² 增加到 61 356 km²,增加了 34.84%。较高植被覆盖度区的面积由 12 001 km² 增加到 13 027 km²,增加了 1 026 km²,高植被覆盖区所占总面积的比例由 7.42%

提高到了 7.91%。而 II 和 III 级植被覆盖等级所占比例有所下降,植被覆盖度较低区域的面积由 64 236 km² 减少到 47 150 km²,减少了 26.60%,中等植被覆盖度区域的面积则由 2008 年的 10 902 km² 减少到 2014 年的 10 400 km²,减少面积为 502 km²。

表 2 2008—2014 黑河流域植被覆盖度面积统计

植被覆盖度等级	植被覆盖度区间/%	2008 年		2014 年		2008—2010 年	
		面积/km ²	所占总面积比例/%	面积/km ²	所占总面积比例/%	变化值/km ²	变化率/%
I	0~20	45504	31.76	61356	42.83		15852
II	20~30	64236	44.84	47150	32.91		-17086
III	30~40	10902	7.61	10400	7.26		-502
IV	40~60	12001	8.38	13027	9.09		1026
V	60~100	10628	7.42	11338	7.91		710
合计		143271	100	143271	100		

3.3 黑河流域植被覆盖度变化对 NPP 的影响

植被覆盖度能够较好的反映不同地物类型的植被覆盖特征以及与地表能量的交换特征^[22],不同植被覆盖度下的 NPP 产量势必存在差异,为了能够定量分析 NPP 与植被覆盖度之间的关系,逐像元提取对应植被覆盖度下的平均 NPP 并作散点图(图 5)。结果表明,两个年份植被覆盖度与平均 NPP 之间的决定系数高达 0.90,说明植被覆盖度对 NPP 的产量具有很好的指示作用,NPP 的产量随植被覆盖度的增大而增加,植被覆盖等级的变化会引起 NPP 的变化。图 5 中两个年份低植被覆盖区(0%~20%, I 级)和高植被覆盖区(60%~100%, V 级)相比其他覆盖等级均较为离散,这是由于高植被覆盖区主要分布

在黑河流域的上游,而低植被覆盖区分布在中下游地区,气候条件(降水、气温)的变化对植被生长影响比较大,而中游则主要受人类活动的影响,此外,由于上游祁连海拔高度高,植被垂直地带性分布比较明显,因而 NPP 产量差异大。文中收集了上游、中游、下游具有代表性的 3 个气象站点(祁连、酒泉、额济纳旗)的气候数据,得到黑河流域 2008—2014 年平均气温和年降水量的变化趋势(图 6),由图 6 可知,上游、中游和下游气候条件差异明显,上游年降水总量>中游年降水总量>下游年降水总量,而气温则是下游>中游>上游,张福平等^[11]的研究表明,黑河上游地区 NPP 的产量主要受降水影响,而气温是制约下游 NPP 产量的主导因素。

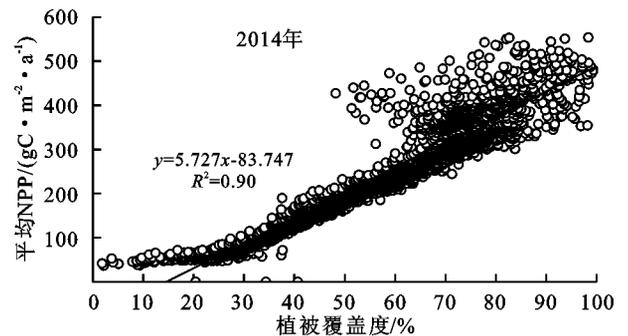
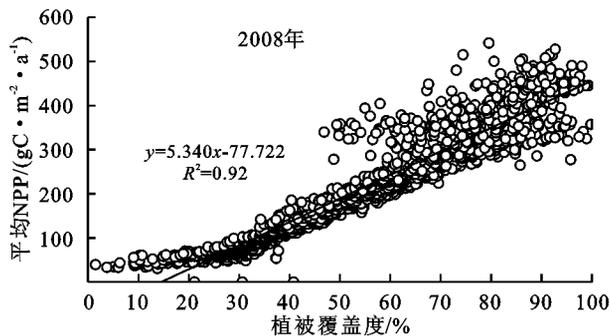


图 5 黑河流域年植被覆盖度与 NPP 的散点图

为定量表达不同等级植被覆盖度变化对 NPP 产量的影响,分别计算 2008 年、2014 年各等级下的 NPP(表 3),可以发现,不同年份各等级植被覆盖度下年均 NPP 的值均存在一定程度的波动。其中高植被覆盖度区增加最多,NPP 均值由 2008 年的 269.29 gC/(m²·a)增加到 2014 年的 282.84 gC/(m²·a),增加幅度为 5.03%。2008—2014 年,较高植被覆盖度区和中度植被覆盖度区的平均 NPP 分别增加 6.18 gC/(m²·a),3.18 gC/(m²·a)。整个黑河流域的平均 NPP 由 2008 年的 42.25

gC/(m²·a)增加到 2014 年的 46.24 gC/(m²·a)。从 2008—2014 年,黑河流域 NPP 总量由 6 052.82 GgC/a 增加为 6 624.54 GgC/a(1 Gg=10⁹g),增加量为 571.718 GgC/a,增加幅度为 9.45%。其中,较低植被覆盖度区的 NPP 有所减少,但减少幅度不大(9.76%),虽然在此期间,低植被覆盖区的面积减少了 17 086 km²(-26.60%),但是较低植被覆盖区的平均 NPP 增加了 22.94%,使得较低植被覆盖区的 NPP 总量减少仅为 25.65 GgC/a。较高植被覆盖度

区和高植被覆盖度区的 NPP 总量增加较多,其中高植被覆盖度区增加最多,从 2 861.96 GgC/a 增加为 3 206.86 GgC/a,增加量为 344.90 GgC/a,较高植被覆盖度区的 NPP 总量增加 251.84 GgC/a,增幅为 12.57%,虽然较高覆盖度区的增加面积比高植被覆盖区多 316 km²,但 NPP 生产总量后者却比前者多 93.06 GgC/a,这与 2014 年黑河流域上游年降雨量的增加(图 6)有着密切联系,同样也说明高植被覆盖区对区域生产力具有重要影响。

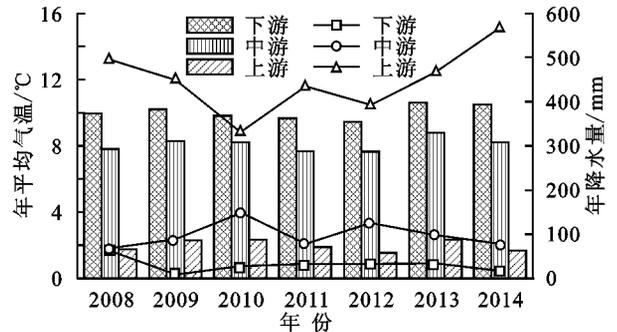


图 6 黑河流域 2008—2014 年平均气温和降水变化趋势

表 3 黑河流域不同等级植被覆盖下的 NPP

参数	低植被覆盖	较低植被覆盖	中度植被覆盖	较高植被覆盖	高植被覆盖	黑河 NPP	
2008 年	0.69	4.09	85.18	166.94	269.29	42.25	
平均 NPP/ (gC · m ⁻² · a ⁻¹)	2014 年	0.68	5.03	88.35	173.12	282.84	46.24
变化量	-0.01	0.94	3.18	6.18	13.56	3.99	
变化率/%	-0.74	22.94	3.73	3.70	5.03	9.44	
2008 年	31.60	262.79	928.58	2003.44	2861.96	6052.82	
NPP 总量/ (GgC · a ⁻¹)	2014 年	42.30	237.14	918.86	2255.28	3206.86	6624.54
变化量	10.70	-25.65	-9.73	251.84	344.90	571.718	
变化率/%	33.84	-9.76	-1.05	12.57	12.05	9.45	

4 结论

(1) 空间分布上,黑河流域 NPP 总体上呈现南多北少,其年平均值的范围处于 0~600 gC/m²,在 upstream 地区的祁连山地带、中游地区的张掖、酒泉、临泽等地 NPP 值普遍较高,下游除沿河外,其他广阔的区域 NPP 值普遍较低,并且在下游的北部地区 NPP 值达到了最低。时间变化上,从 2008—2014 年,整个流域 NPP 均值呈现上升的趋势,说明了该流域的生态环境总体上有所改善变好。

(2) 黑河流域低植被覆盖度的区域主要分布在 upstream 祁连海拔较高的地区、中游金塔县东北部、下游额济纳旗的西部、南部以及东南部等覆盖有积雪、戈壁或者沙漠的地区,较低植被覆盖区主要分布在黑河流域下游的西部,中等植被覆盖度区主要分布在肃南县北部和上游山丹县,较高植被覆盖区主要分布在 upstream 民乐县、祁连西北部以及金塔县等土地覆盖类型以人工栽培植被和草甸植被为主的地区,高植被覆盖区则分布在祁连县、中游等流量比较大的地区。相比 2008 年、2014 年 I、IV 和 V 级植被覆盖等级所占比例有所上升,II 和 III 级植被覆盖等级所占比例有所下降。

(3) 黑河流域植被覆盖度与平均 NPP 之间的决定系数高达 0.90,说明了植被覆盖度对 NPP 的产量具有很好的指示作用,并且 NPP 的产量随植被覆盖度的增大而增加。黑河流域上游、中游、下游影响植被生长的主导性因子不同,上游地区主要受降水影响,下游受气温影响较大。

(4) 从 2008—2014 年,黑河流域 NPP 总量由 6 052.82 GgC/a 增加为 6 624.54 GgC/a,增加幅度为 9.45%,其中,面积减少 17 086 km² 的低植被覆盖区 NPP 总量减少仅为 25.65 GgC/a,而其中高植被覆盖度区增加最多,从 2 861.96 GgC/a 增加为 3 206.86 GgC/a,增加量为 344.90 GgC/a,较高植被覆盖度区的 NPP 总量增加次多,增加了 251.84 GgC/a,增幅为 12.57%。

参考文献:

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998,281(5374):237-240.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999,5(S1):1-15.
- [3] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,81(1):58-66.
- [4] Euskirchen E S, Chen J, Li H, et al. Modeling landscape net ecosystem productivity (LandNEP) under alternative management regimes[J]. *Ecological Modelling*, 2002,154(1):75-91.
- [5] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994,99(3):5263-5283.

- 24(2):71-76.
- [9] 郑亚运,赵清,黄巧华,等. 济南市南部山区土地利用变化与地形因子关系研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4):149-153.
- [10] 郭洪峰,许月卿,吴艳芳. 基于地形因子的大都市边缘区土地利用变化分析:以北京市平谷区为例[J]. 中国农业大学学报, 2013, 33(1):178-187.
- [11] 哈凯,丁庆龙,门明新,等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系:以河北省怀来县为例[J]. 地理研究, 2015, 34(5):909-921.
- [12] 李丹,刘丹丹,赵金祥. 基于 DEM 的山区土地利用变化分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1):66-70.
- [13] 郜红娟,张朝琼,张凤太. 基于地形梯度的贵州省土地利用时空变化分析[J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(1):62-70.
- [14] 吴见,王帅帅,谭靖. 基于安徽省土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2):239-248.
- [15] 薛亚永,王晓峰. 基于地形梯度的陕西省土地利用变化研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11):56-63.
- [16] 孙丕苓,许月卿,王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14):277-288.
- [17] 常雄凯,刘森,李春林,等. 辽宁沿海土地利用变化的图谱特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12):3459-3465.
- [18] 赵丽红,杨泽栋,潘鹏,等. 南昌市景观信息图谱的地形梯度效应分析[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(4):767-775.
- [19] 许艺萍. 鄱阳湖区土地利用时空变化特征研究[J]. 江西农业大学学报:社会科学版, 2009, 8(2):8-12.
- [20] 钟海燕. 鄱阳湖区土地利用变化及其生态环境效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [21] 李辉,张利华,陈晓玲. 基于 GIS/RS 的鄱阳湖区土地利用变化及空间分异特征研究[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 2009, 43(4):666-671.
- [22] 雷慧敏,叶长盛. 鄱阳湖生态经济区县域城镇化水平综合测度及其差异[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2):158-164, 170.
- [23] 李京京,吕哲敏,石小平,等. 基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7):230-236.
- [24] 喻红,曾辉,江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1):64-69.
- [25] 斯钧浪,齐伟,曲衍波,等. 胶东山区县域土地利用在地形梯度上的分布特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):679-685.

(上接第 209 页)

- [6] 韩艳飞,柯长青,李晶. 近 30 年关天经济区植被净初级生产力对土地利用变化的动态响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6):68-74.
- [7] 王宗明,国志兴,宋开山,等. 2000—2005 年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1):136-146.
- [8] 王翠翠,蒋卫国,冯刚,等. 2000—2010 年武汉城市圈建设用地扩张对植被净初级生产力的影响[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(4):674-679.
- [9] 王原,黄玫,王祥荣. 气候和土地利用变化对上海市农田生态系统净初级生产力的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3):641-648.
- [10] 张志强,徐中民,王建,等. 黑河流域生态系统服务的价值[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4):360-366.
- [11] 张福平,冯起,李旭谱,等. 黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2014(6):1657-1664.
- [12] 卢玲,李新. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算[J]. 中国沙漠, 2006, 25(6):823-830.
- [13] 怀保娟,李忠勤,孙美平,等. 近 50 年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3):365-377.
- [14] 王根绪,程国栋. 近 50 年来黑河流域水文及生态环境变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3):233-238.
- [15] 马国泰. 黑河流域景观生态特征分析研究[J]. 河西学院学报, 2003, 19(2):42-46.
- [16] 张一驰,于静洁,乔茂云,等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7):757-765.
- [17] 李登科,范建忠,王娟. 基于 MODIS A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2776-2782.
- [18] 顾娟,李新,黄春林. 基于时序 MODIS NDVI 的黑河流域土地覆盖分类研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(3):317-326.
- [19] 甘春英,王兮之,李保生,等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8):1019-1024.
- [20] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报, 2015, 70(5):717-729.
- [21] Gutman G G. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2):121-136.
- [22] Zhang J, Yao F, Fu C, et al. Study on response of ecosystem to the East Asian monsoon in eastern China using LAI data derived from remote sensing information[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(3):279-282.