

引用格式:李伟霄,徐军,姚雅情,张志才. 全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数(NDVI)时空变化特征探讨[J]. 山地学报,2021,39(4):473-482.

LI Weixiao, XU Jun, YAO Yaqing, Zhang Zhicai. Temporal and spatial change characteristics of vegetation cover(NDVI) in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau under global warming [J]. Mountain Research, 2021, 39(4):473-482.

全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数(NDVI)时空变化特征探讨

李伟霄^{1,2}, 徐军^{1*}, 姚雅情¹, 张志才¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 南京大学 金陵学院, 南京 210089)

摘要: 深入探讨近期三江源地区植被覆盖度随全球气候变暖的时空变化过程对三江源国家公园与生态文明建设具有重要意义。已有研究从不同视角对三江源地区生态环境变化进行了探讨,但对三江源地区复杂的地理环境以及全球变暖背景下的生态系统变化及其影响研究仍显薄弱,特别是对近期气候变暖对植被覆盖程度变化的影响研究更为缺乏。本文利用 NASA 官方网站下载的 2006—2015 年十年的植被 NDVI 数据产品,分析了三江源地区地表植被十年的时空变化特征及其影响因素。结果显示:(1)三江源地区植被 NDVI 具有显著的季节变化特征,年变化呈现出波动并且有微弱上升的趋势,三江源地区植被覆盖整体呈现趋好的态势;(2)植被覆盖度的空间变化表现出在三江源地区的东、南部较好、西北部较差的状况;(3)植被覆盖度的趋好变化主要受夏季主导,这和气候变暖、区域降水增加有关,与夏季土壤湿度增大有显著关系,但“整体趋好、局部恶化”的状况仍不容忽视。本研究可为揭示三江源地区植被覆盖度的变化过程与变化规律和生态修复提供科学依据。

关键词: 三江源区;植被指数(NDVI);时空变化;土壤湿度;青藏高原

中图分类号: Q948.112

文献标志码: A

气候变暖已成为不争的事实。在北半球,全球平均陆地表面温度在 1880—2012 年期间已升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1-2]。中国陆地表面温度近百年来平均增高 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]。这种变暖过程在高纬度地区和青藏高原地区表现尤为明显,对地表过程和生态系统产生了重大影响,地表植被生长状况表现尤为明显。植被指数(NDVI)是描述植被生长数量与质量以及生物量等指标的指示参数,大量研究结果已证明利用遥感资料分析植被指数能有效地反映植被的生长状态、覆盖程度及其变化 [4-7]。

气候变暖给青藏高原地区的生态环境也带来了一系列影响,例如高原降水增加 [8-9]、高山冰川消融后退、冰雪融水增加 [10-13],湖泊水位升高面积扩大 [14-16]、多年冻土夏季融化层加厚 [17-20];气候变化还导致土壤干化、草场沙化严重 [21-25],严重影响着青藏高原的生态屏障和生态文明建设以及国家公园野生动物栖息地的保护。三江源地区是我国乃至亚洲重要的水源涵养区及生态安全屏障,对于三江源地区生态环境变化,国家和地方政府给与了高度重视,投入大量资金进行生态修复和自然保护,取得了

收稿日期(Received date):2021-04-01; 改回日期(Accepted date):2021-07-23

基金项目(Foundation item):自然资源部 127 专项课题(515050912)。[Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China 127 Special Project (515050912)]

作者简介(Biography):李伟霄(1985-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向:自然环境与生态。[LI Weixiao(1985-), male, born in Lanzhou, Gansu province, M. Sc. candidate, research on geography environment and ecology] E-mail: 29954650@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author):徐军(1966-),女,博士,副教授,主要研究方向:自然地理学和遥感与 GIS 研究。[XU Jun (1966-), female, Ph. D., associate professor, research on physical geography and remote sensing and GIS] E-mail: navy@hhu.edu.cn

一定的成效。不少学者也从不同角度开展了研究,如较多的学者从三江源植被覆盖的时空特征^[21]、影响机理^[25]等方面开展研究,也有学者从三江源的生态系统格局变化^[26-27]、生态系统功能变化^[28-29]、生态保护^[23]等角度开展研究,上述研究从不同视角对三江源生态环境的变化进行了探讨,但对三江源地区复杂的地理环境以及全球变暖背景下的生态系统变化及其影响的研究仍显薄弱,特别是对近期气候变暖对植被覆盖程度变化的影响研究更为缺乏。此外,三江源地区是多年冻土分布区,地下冻结水在气候变暖条件下参与到水循环过程中并对植被生长产生影响。因此,其植被的分布和覆盖变化具有一定的独特性和典型性,对植被 NDVI 的变化过程的探讨对该区域生态修复和自然保护具有至关重要的意义。国家“十四五”规划中也已明确将青藏高原作为生态建设的重点区域之一。

为深入了解气候变暖过程对青藏高原生态系统的影响,本文选择青藏高原三江源地区为典型研究区,以 2006—2015 年地表植被 NDVI 数据产品为数据源,分析三江源地区地表植被 NDVI 的时空变化特征及其影响因素,以期揭示三江源地区植被覆盖度的变化过程与规律和生态修复提供科学依据。

1 区域概况

青藏高原三江源地区是指我国黄河、长江、澜沧

江三大江河的源头地区,位于青藏高原的东北部,地理位置为 $31^{\circ}39' \sim 36^{\circ}12'N$, $89^{\circ}45' \sim 102^{\circ}23'E$,其大部分隶属于青海省,总面积为 30.25 万 km^2 ,约占青海省总面积的 43%,其海拔基本都在 4000 m 以上(图 1)。昆仑山、巴颜喀拉山、可可西里山、阿尼玛卿山及唐古拉山脉横贯其间,其海拔为 5000 ~ 6000 m。历史上,三江源区曾是水草丰美、河流密布、湖泊星罗棋布、沼泽众多、雪山冰川广布、野生动物种群繁多的高原草原草甸区,是青藏高原重要生态屏障,对促进我国生态文明建设及国民经济发展起着重要作用。同时,三江源地区也是青藏高原野生动物的重要栖息地,包含国家一级重点保护动物 16 种、国家二级重点保护动物 35 种^[31]。1997 年国家批准建立“可可西里国家级自然保护区”,2000 年批准建立“三江源国家级自然保护区”,国家又将两者整合批准建立“三江源国家公园”。

2 数据与方法

2.1 NDVI 数据来源及处理

NDVI,即归一化植被指数,是衡量植被生长状况和生物量的有效指标。本文使用的 MODISNDVI 数据产品来源于美国国家航空航天局(NASA)官方网站(<https://www.nasa.gov/>),选取 2006 年 3 月至 2015 年 11 月的 MOD13C2 NDVI 数据集产品,该数据产品分辨率为 0.05 Deg。利用 Matlab 软件,使用

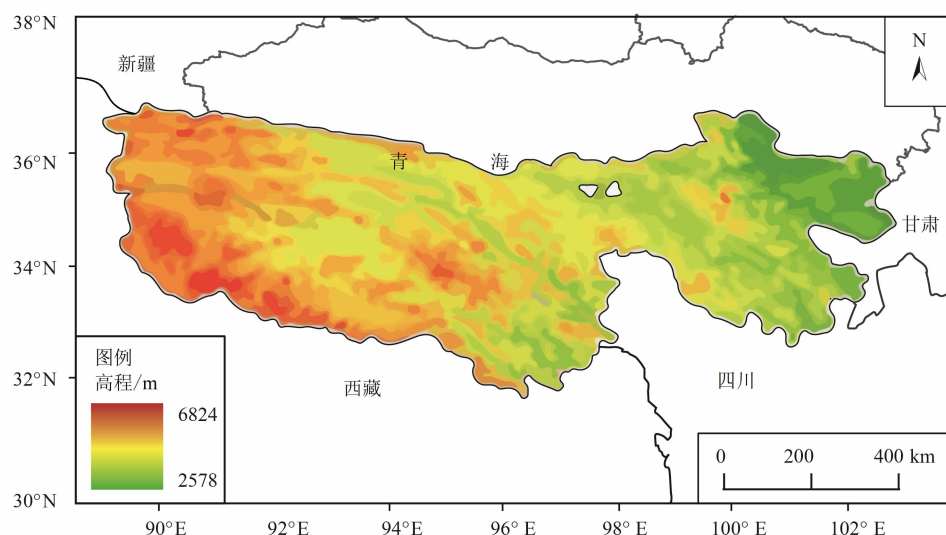


图 1 青藏高原三江源位置及高程分布图

Fig. 1 Position and elevation of the Three-River Headwater Region on the Tibetan Plateau

hdfread 和 geotiffwrite 函数将 HDF 格式转换为 GeoTiff 格式,并完成投影转换,投影转换后其坐标系为 GCS_WGS_1984;此外,通过一系列编程语句实现 NDVI 数据的范围选取,并将其空间分辨率统一到 0.25 Deg,将时间尺度由月转换为季节,并将 NDVI 值转换为 $[-1, 1]$ 的真值。

2.2 土壤湿度数据来源及处理

本文选用欧洲航天局 2017 年 11 月发布的土壤湿度数据集 V3.3 产品,选取 2006 年 3 月到 2015 年 11 月期间的数据。其空间分辨率为 0.25 Deg。利用 Matlab 软件平台上 ncread 函数,选择读取研究区范围的土壤湿度数据,并利用 geotiffwrite 函数将其转换为 Geotiff 格式,再通过编程语句实现时间尺度由天到月再到季节的转换。由于该数据在空间上出现部分区域的空值,本文借助 Matlab 平台,选取气温、降水和风速等环境因子,利用 stepwisefit 函数,通过逐步回归方法,建立各个季节不同植被类型的土壤湿度和各因子之间的模型,对数据集进行内插处理,得到完整的土壤湿度数据;经过误差检验,得到平均误差为 0.004。

2.3 气象数据来源及处理

气象数据采用寒区旱区科学数据中心的中國高分辨率地面气象要素驱动数据集。本文选用的气象要素包括气温、降水和风速,其时间跨度为 2006 年 3 月~2015 年 11 月,并利用编程语言进行数据转换,将空间分辨率统一为 0.25 Deg。将气温单位换算成 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 其他数据来源及处理

植被类型数据来源于 GLCF 网站(<http://www.landcover.org/>)的 MCD12Q1 数据产品,其分辨率为 0.5 Deg;DEM 数据来源于地理空间数据云平台,分辨率为 90 m。

统一以上数据分辨率,进行拼接、裁剪、重采样等数据预处理流程,以 2006—2015 年三江源地区植被 NDVI 数据为基础,探讨三江源地区植被 NDVI 在时间、空间的变化情况。

3 结果与讨论

3.1 三江源区植被 NDVI 时间变化趋势

3.1.1 NDVI 月平均值的年内变化趋势

以 2006 年 3 月~2015 年 11 月期间的 NDVI 数

据为基础,以月为时间尺度分别计算其 10 年的各月份 NDVI 平均值,处理后得到三江源区月平均 NDVI 的变化趋势(图 2)。

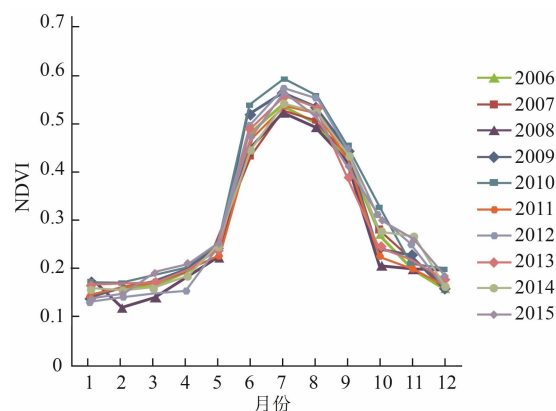


图 2 2006—2015 年三江源植被 NDVI 月均值变化趋势图

Fig. 2 Mean monthly NDVI value change pattern in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015

可以看出,10 年间三江源植被 NDVI 值在 1—4 月基本不变,保持在 0.1~0.2;4—5 月有小幅上升,5 月开始,三江源地区开始解冻,植被 NDVI 值有明显急速提升,每年 7 月达到最大值(0.5~0.6),其中 2010 年 7 月 NDVI 值最大,几乎达到了 0.6;9 月中下旬开始,植被开始枯萎,NDVI 值开始大幅度降低;10—12 月 NDVI 值始终保持较低水平,在 0.2 上下浮动。图 2 显示出三江源区 10 年来 NDVI 月均值年内变化趋势呈现出明显的季节特征。因此,将 3—5 月视为春季(植被返青季),6—8 月视为夏季(植被旺盛季),9—11 月视为秋季(植被枯萎季),12 月至次年 2 月视为冬季(植被凋亡季),由于冬季(植被凋亡季)NDVI 值过低,故不考虑冬季植被 NDVI 变化情况。

3.1.2 平均 NDVI 季节变化趋势

通过对 2006—2015 年间三江源区植被 NDVI 值分别以春季、夏季和秋季进行平均值的计算,分析三江源区十年间植被覆盖的不同季节变化,得出不同季节植被覆盖的年际变化趋势图(图 3)。

由图 3 可见,三江源区植被覆盖存在明显季节差异,夏季植被覆盖程度最高,多年来均值始终保持在 0.480~0.556;春季植被覆盖程度最低,均值为 0.179~0.219;秋季 NDVI 值介于夏、春季之间,均值为 0.283~0.336。春、夏、秋三季的 NDVI 最高和最低值出现年份各不相同,春季最高值出现年份依

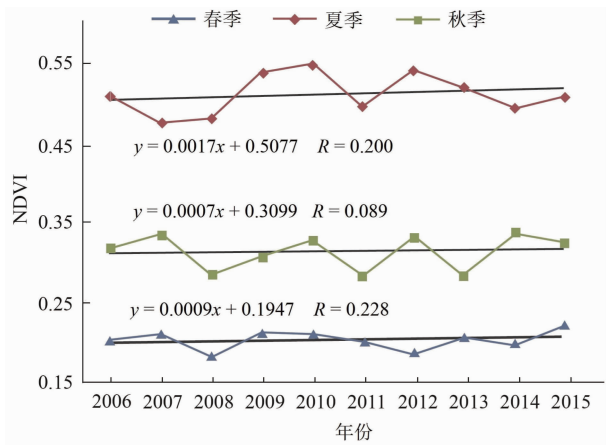


图 3 2006—2015 年间三江源区不同季节植被 NDVI 的年际变化趋势图

Fig. 3 Mean seasonal NDVI change trend in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015

次是 2007、2009—2010 和 2015 年;夏季最高值出现年份依次是 2009—2010 和 2012 年;秋季最高值出现年份则分别为 2007、2010、2012 和 2014 年。2006—2015 年 10 年间不同季节 NDVI 的多年变化特征,可以看出其均呈现微弱增长态势,其中以夏季增加幅度最大、秋季增幅最小。

3.1.3 平均 NDVI 年际变化趋势

从图 4 明显看出,2006—2015 年间三江源区植被 NDVI 值呈现波动缓慢上升特点,说明了三江源地区植被覆盖程度随气候变暖整体上呈现变化趋势。2008 年为 NDVI 年均值最低年份,2008 年后 NDVI 均值开始迅速提高,植被覆盖状况明显改善,2010 年 NDVI 均值达到最高后又波动下降,2014 年

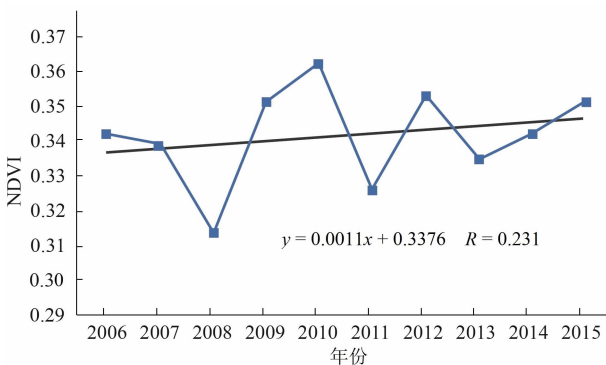


图 4 2006—2015 年间三江源区植被平均 NDVI 年际变化趋势图

Fig. 4 Mean annual NDVI change trend in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015

后又有所上升。三江源地区植被生长的不稳定性反映出区域自然地理条件和所受到的影响因素的复杂性,但总体上植被生长的年变化趋势是受夏季植被生长趋势的主导。

3.2 三江源区植被 NDVI 空间变化特征及趋势

3.2.1 植被 NDVI 季节变化的空间分布特征

三江源区 2006—2015 年间春季、夏季、秋季(各季节 NDVI 均值的空间分布及不同阈值面积占比如图 5 所示。整体上,春、夏、秋三季三江源区植被 NDVI 在空间分布趋势几乎一致,都呈现由东南向西北 NDVI 值逐渐减小的分布特征,可见三江源东、南部地区植被覆盖程度最高,西北部地区植被覆盖程度最低;春季三江源区植被覆盖最为薄弱,NDVI 值为 0 ~ 0. 200 的地区面积占三江源总面积的 54%;夏季三江源区植被覆盖情况最好,大部分地区 NDVI 值为 0. 200 ~ 0. 600,约占区域总面积的 58%,但部分地区 NDVI 均值已大于 0. 6,面积占比约为 37%;秋季三江源区 NDVI 均值为 0 ~ 0. 600,空间分布上仍呈现东部高、西北部低的特点,而大部分区域 NDVI 均值为 0. 200 ~ 0. 400,其面积约占三江源区总面积的 56%。

3.2.2 植被 NDVI 年变化趋势空间分布特征

对 2006—2015 年三江源区植被年平均 NDVI 值进行逐像元的线性回归趋势分析,并利用自然间断点分级法划分变化斜率,将年均 NDVI 变化趋势划分为轻度减少、基本不变、轻度增加、中度增加和明显增加五个等级,得到 NDVI 年变化趋势空间分布特征如图 6 所示,其面积统计如表 1 所示。2006—2015 年整个三江源区植被 NDVI 年均变化趋势总体上呈现改善趋势。其中,基本不变和轻度增加地区所占面积最大,两者分别占三江源区总面积的 25. 7%,中度增加区域面积次之,约占研究区

表 1 2006—2015 年三江源区年均 NDVI 变化趋势结果统计表

Tab. 1 Statistical results of mean annual NDVI value change in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015

变化等级	斜率/(10 ⁻⁴)	面积/km ²	占比/%
轻度减少	-13 ~ -5	25 351	7. 20
基本不变	-5 ~ 4	90 354	25. 70
轻度增加	4 ~ 12	90 354	25. 70
中度增加	12 ~ 20	95 554	27. 20
明显增加	20 ~ 39	50 052	14. 20

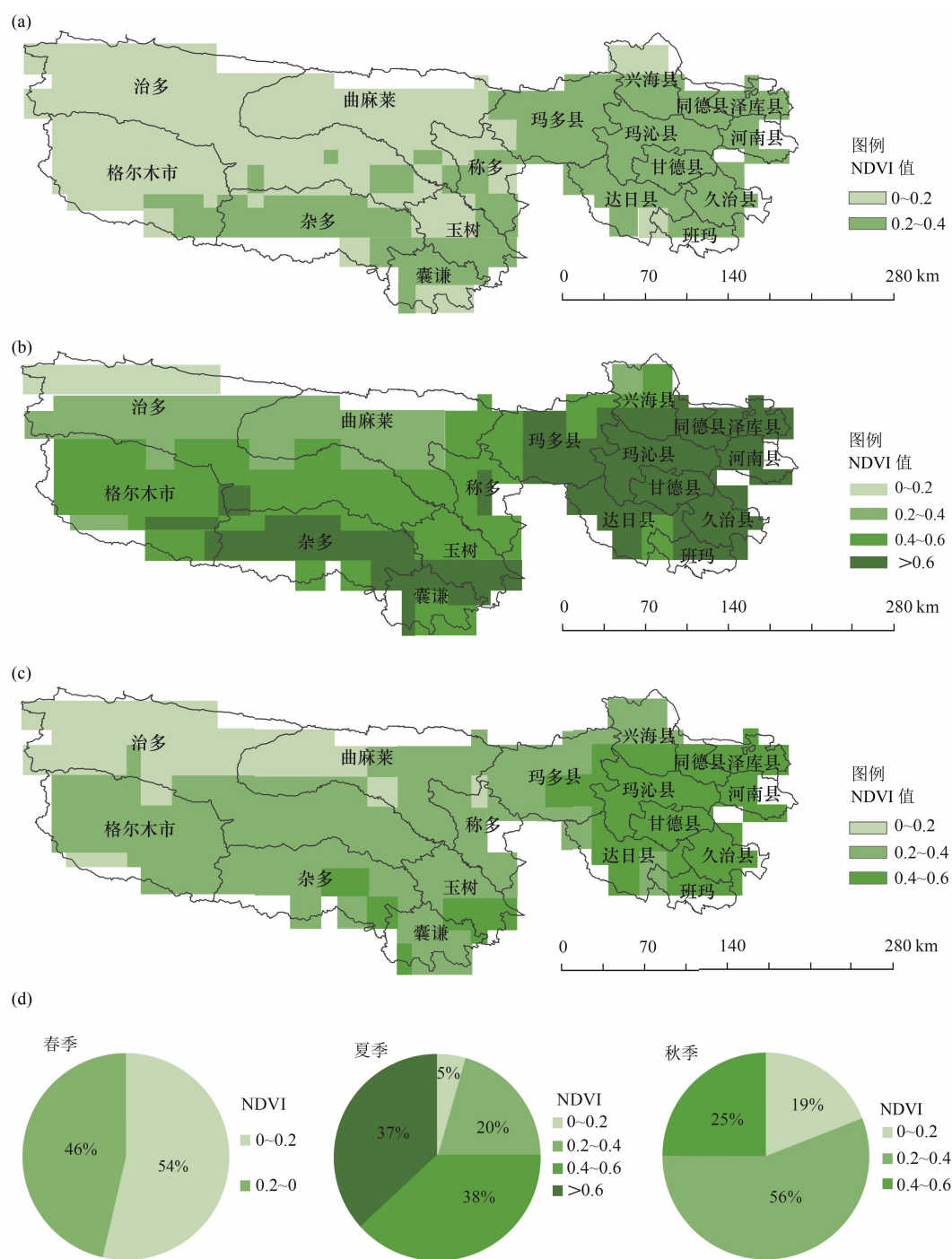


图5 2006—2015年间三江源区三季NDVI均值空间分布与均值面积占比图:

(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)NDVI均值面积占比

Fig.5 The spatial distribution and area proportion of mean NDVI in three seasons in the Three-River Headwaters Region from 2006 to 2015 are as follows: (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) average area ratio of NDVI

27.2%, 明显改善的区域面积约为 50 052 km², 占比约为 14%, 年均植被覆盖退化程度仅为轻微减少, 面积占比约为 7%。从年均 NDVI 变化趋势的空间分布图可以看出, 植被覆盖轻微退化部分大多位于长江源区中西部, 呈东西向沿宽广河谷分布, 黄河源

区仅有东北角小部分区域年均植被发生退化。此外, 三江源南部和东部地区植被覆盖均有所改善, 尤其是曲麻莱西北部、囊谦和甘德县区域植被覆盖明显增加。这一方面可能与 2003 年开始设立自然保护区, 人类活动对植被的负面影响得到一定的抑制

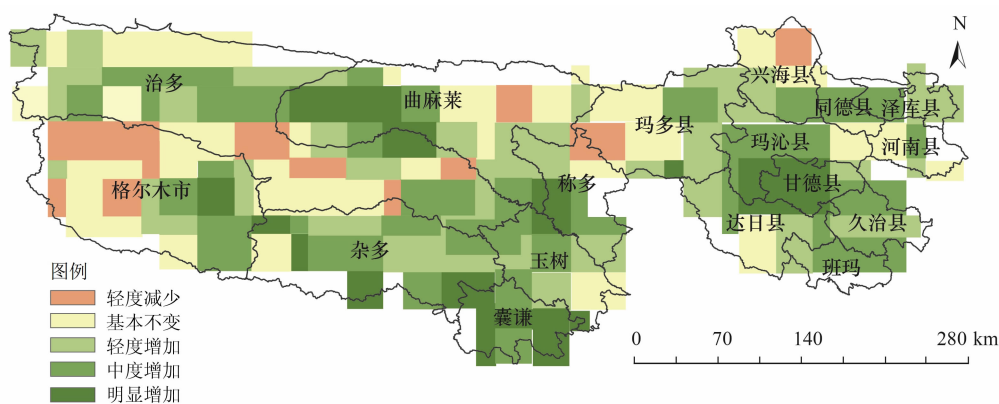


图 6 2006—2015 年三江源区植被年均 NDVI 变化趋势空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution of mean annual NDVI value in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015.

有关,另一方面也与气候变暖降水增加有关。这与三江源地区植被覆盖实地考察的结果一致,东部和南部分布着大片的高寒草甸与高寒草原植被,而长江源西、北部则是荒漠与荒漠草原植被,局部分布着大片沙丘。

3.3 讨论

三江源地区植被覆盖度整体较低,其 NDVI 均值为 0 ~ 0.60。2006—2015 年,植被覆盖度呈轻微增加趋势,改善的区域面积占总面积的 67.10%,并且以夏季增加为主导,这与气候变暖、降水增加改善了区域植被的水热条件、促进植被生长有直接关系。作为重要的气候因子,三江源区的地温和土壤湿度因子在十年间具有一定的变化特征;同时,三江源区作为多年冻土的分布区,冻土随气候变暖出现融化,从而影响地温和土壤湿度。如图 7 所示,通过对十年间的地温的平均值年际变化计算与分析,可以看出日间和夜间地温十年间都呈现波动上升的趋势,其上升斜率分别为 0.095 和 0.018,尤其日间地温上升趋势更为明显,日间地温波动幅度为夏季 > 春季 > 秋季,夜间地温波动幅度是夏季 > 秋季 > 春季。

图 8 则显示出了十年间三江源区土壤湿度呈现微弱波动上升的变化特点,春、夏、秋三季平均土壤湿度为 0.17、0.22 和 0.20,表现出夏季 > 秋季 > 春季的特征。

十年年均及春、夏、秋季平均地温和土壤湿度值分别与年均和春、夏、秋季 NDVI 均值进行逐年的偏相关分析(表 2),结果表明,三江源区植被 NDVI 与日间和夜间地温的相关关系在年均和春、夏、秋季四

个层面上都没有通过 0.05 的显著性检验;而夏季 NDVI 与土壤湿度表现为显著正相关,皮尔森偏相关系数为 0.967, *P* 值约 0.03。

表 2 NDVI 与土壤湿度 (*SM*) 日间、夜间地表温度 (*GSTday*、*GSTnight*) 的偏相关系数

Tab.2 Partial correlation coefficient between NDVI and soil moisture (*SM*), daily ground surface temperature (*GSTday*) and ground surface temperature at night (*GSTnight*)

	年均	春季	夏季	秋季
<i>SM</i>	0.038	-0.156	0.967 *	-0.074
<i>GSTday</i>	0.151	0.359	-0.006	0.369
<i>GSTnight</i>	0.451	-0.739	0.528	0.320

“*”表示相关系数通过了 0.05 的显著性检验

这也说明了 2006—2015 年间三江源地区植被覆盖度的改善主要是受制于夏季的土壤湿度,而降水的多寡和多年冻土的融化都会影响到土壤湿度的变化。这与前人研究的结果相一致^[8,25,30]。另外,多年冻土随着气候变暖而活动层增厚,地下冻结水随着冻土融化而流失,使得部分地区植被退化、草场沙化并发育大片沙丘(图 9)。

因此,三江源地区植被覆盖的变化具有显著的区域特殊性和影响因素复杂性。三江源地区生态环境“整体趋好、局部恶化”的局面仍不容忽视。而未来气候变化趋势以及多年冻土水文过程对生态系统的影响都值得深入研究。

4 结论

(1) 三江源区植被覆盖度整体较低,2006—

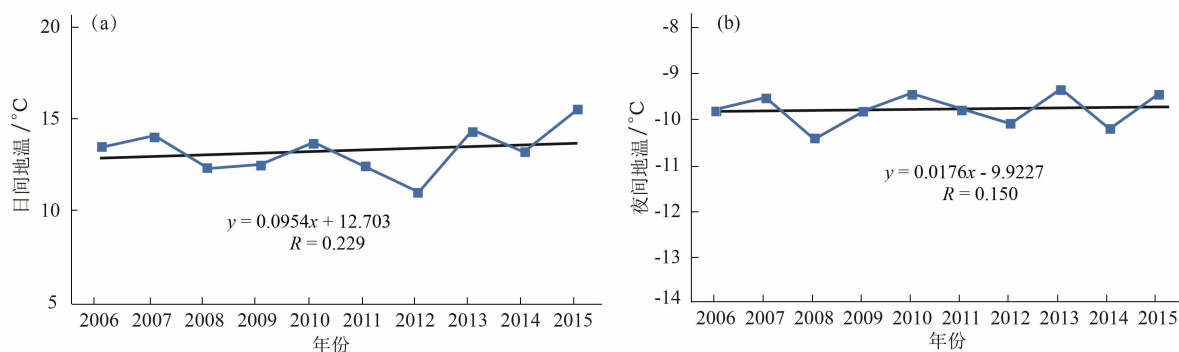


图7 2006—2015年三江源区日间7(a)和夜间7(b)地表温度年际变化趋势

Fig. 7 Inter-annual variation of daily(a) and night(b) ground surface temperature in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015

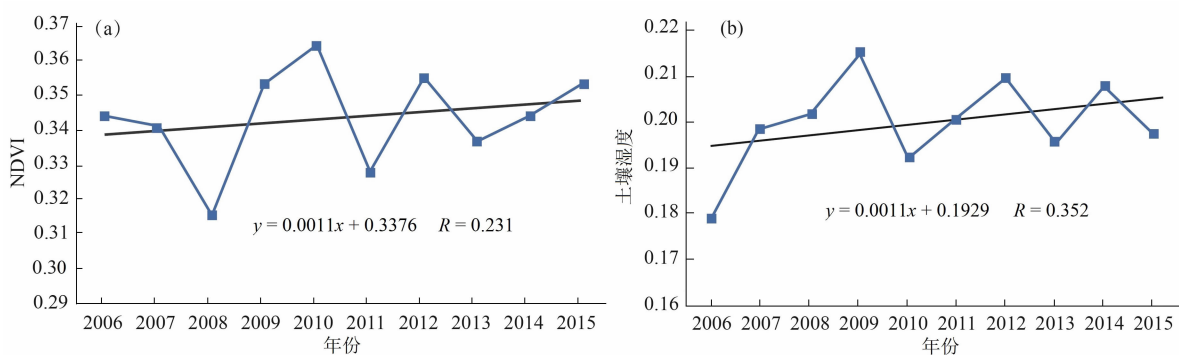


图8 三江源地区植被NDVI年际变化8(a)与土壤湿度年际变化8(b)对比图

Fig. 8 Comparison between NDVI (left) and soil moisture (right) in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau from 2006 to 2015



图9 三江源地区长江源勒玛曲谷地的大片沙丘

Fig. 9 Sand dunes developed in the Liemaqu valley in the head area of Yangtze River

2015年间每年的植被NDVI具有显著的季节变化特征,植被覆盖状况以夏季最好、秋季次之、春季最差,春、夏、秋三季NDVI平均值分别是0.200、0.517和0.313。

(2) 2006—2015年间,三江源地区植被NDVI年变化趋势呈现出波动并微弱上升的特点,反映出三江源地区植被覆盖整体呈现趋好的态势,年NDVI均值约为0.343,十年间NDVI最高值出现在2010

年,约为0.364,最低值出现在2008年,约为0.313;但“整体趋好、局部恶化”的状况仍不能忽视,国家公园的生态建设仍任重道远。

(3) 2006—2015年间,三江源地区植被覆盖度的空间变化表现在东、南部较好、西、北部较差的局面;黄河源区NDVI十年间变化趋势在春夏两季均呈增加,而秋季北部地区植被覆盖减少;长江源大部分区域在夏秋两季呈现增加趋势,而春季中、西部部

分区域植被覆盖减少;澜沧江源南部在春、夏、秋季均呈现植被覆盖增加趋势。

(3)三江源地区 2006—2015 年间植被覆盖度的趋好变化主要受夏季主导,这和随气候变暖区域降水增加、多年冻土融化有关,也与夏季土壤湿度增大显著相关。因此,气候变化和多年冻土区的水文过程是该区域植被覆盖度变化的重要影响因素,值得深入探讨。

参考文献 (References)

- [1] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014: 15 - 20. DOI: 10.1080/09168451.2014.910103
- [2] 秦大河, STOCKER T, et al. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1 - 6. [QING Dahe, STOCKER T, et al. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 1 - 6] DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(1): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3 - 8. [DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and the future trend [J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3 - 8] DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2007.01.001
- [4] GRIFFITH J A, MARTINKO E A, WHISTLER J L, et al. Interrelationships among landscapes, NDVI, and stream water quality in the U. S. central plains [J]. Ecological Applications, 2002, 12(6): 1702 - 1718. DOI: 10.1890/1051-0761(2002)012[1702:IALNAS]2.0.CO;2
- [5] KAWAMURA K, AKIYAMA T, WATANABE O, et al. Estimation of aboveground biomass in Xilingol Steppe, Inner Mongolia using NOAA/NDVI [J]. Grassland Science, 2003, 49(1): 1 - 9. DOI: 10.14941/grass.49.1
- [6] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204 - 210. [SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environment factors by using NOAA time series data [J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3): 204 - 210] DOI: 10.1088/0256-307X/15/12/025
- [7] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. 生态学报, 2005, 24(7): 715 - 718. [ZHANG Qiang, XIAO Fengjin, NIU Haishan, et al. Analysis of vegetation index sensitivity to soil moisture in Northern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 715 - 718] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2005.0028
- [8] 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 1960 - 2015 年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1803 - 1820. [LIU Xiaoqiong, WU Zezhou, LIU Yansui, et al. Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1803 - 1820] DOI: 10.11821/dlxb201909008
- [9] 李珊珊, 张明军, 汪宝龙, 等. 近 51 年来三江源区降水变化的空间差异[J]. 生态学报, 2012, 31(10): 2635 - 2643. [LI Shanshan, ZHANG Mingjun, WANG Baolong, et al. Spatial difference of precipitation variation in Three-River Headwaters Region of China in recent 51 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2635 - 2643] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0394
- [10] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 517 - 522. [PU Jianchen, YAO Tandong, WANG Ninglian, et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai - Tibetan plateau during the past century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 517 - 522] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2004.05.001
- [11] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179 - 186. [YAO Tandong, QING Dahe, SHEN Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(3): 179 - 186] DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.03.004
- [12] 陈虹举, 杨建平, 谭春萍. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 16 - 23. [CHEN Hongju, YANG Jianping, TAN Chunping. Responsivity of glacier to climate change in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 16 - 23] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0003
- [13] BRUN F, BERTHIER E, WAGNON P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000 - 2016 [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 668 - 673. DOI: 10.1038/NGEO2999
- [14] 李林, 吴素霞, 朱西德, 等. 21 世纪以来黄河源区高原湖泊群对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 245 - 253. [LI Lin, WU Suxia, ZHU Xide, et al. Response of the plateau lakes to changes of climate and frozen earth environment in the headwaters of the Yellow River since the 21st century [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 245 - 253] DOI: 10.3321/j.issn.1000-3037.2008.02.009
- [15] 戴玉凤, 高杨, 张国庆, 等. 2003 - 2011 年青藏高原佩枯错相对

- 水量变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 723 – 732. [DAI Yufeng, GAO Yang, ZHANG Guoqing, et al. Water volume change of the Paiku Co in the southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003 – 2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 723 – 732] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0082
- [16] 梁斌, 齐实, 李智勇, 等. 青藏高原湖泊面积动态变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2018, **36**(2): 206 – 216. [LIANG Bin, QI Shi, LI Zhiyong, et al. Dynamic change of lake area over the Tibetan Plateau and its response to climate change [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2): 206 – 216] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000316
- [17] 李述训, 程国栋, 郭东信. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势数值模拟[J]. 中国科学(D辑), 1996, **26**(4): 342 – 347. [LI Shuxun, CHENG Guodong, GUO Dongxin, The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai – Tibet Plateau, under climate warming [J]. Science in China (Series D), 1996, **26**(4): 434 – 441]
- [18] 吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土退化过程及方式[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(11): 1570 – 1578. [WU Jichun, SHENG Yu, WU Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai – Tibet Plateau [J]. Science in China Series D – Earth Science, 2009, **39**(11): 1570 – 1578] DOI: 10.1007/s11430-009-0198-5
- [19] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情境下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(3): 505 – 511. [ZHANG Zhongqiong, WU Qingbai. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai – Tibet Plateau as climate warming [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(3): 505 – 511]
- [20] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, **64**(27): 2783 – 2795. [CHENG Guodong, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai – Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(27): 2783 – 2795] DOI: 10.1360/TB-2019-0191
- [21] 张懿锂, 丁明军, 张玮, 等. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景[J]. 地理研究, 2007, **26**(3): 500 – 507. [ZHANG Yili, DING Mingjun, ZHANG Wei, et al. Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River in China [J]. Geographical Research, 2007, **26**(3): 500 – 507] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2007.03.010
- [22] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报, 2008, **63**(4): 364 – 376. [LIU Jiyuan, XU Xinliang, SHAO Quanqin. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai province [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(4): 364 – 376] DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2008.04.006
- [23] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报, 2016, **71**(1): 3 – 20. [SHAO Quanqin, FAN Jiangwen, LIU Jiyuan, et al. Assessment on the effects of the first – stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(1): 3 – 20] DOI: 10.11821/dlxb201601001
- [24] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(7): 1968 – 1975. [WEI Jing, GUO Yamin, SUN Lin, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(7): 1968 – 1975] DOI: 10.13292/j.1000-4890.20150615.007
- [25] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 等. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3388 – 3396. [PENG Kaifeng, JIANG Weiguo, HOU Peng, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its affecting factors in the Three-river-source National Park [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(10): 3388 – 3396] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.019
- [26] 王根绪, 郭晓寅, 程国栋. 黄河源区景观格局与生态功能的动态变化[J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1587 – 1598. [WANG Genxu, GUO Xiaoyin, CHENG Guodong. Dynamic variations of landscape pattern and the landscape ecological functions in the source area of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(10): 1587 – 1598] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2002.10.003
- [27] 王根绪, 丁永建, 王建, 等. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. 地理学报, 2004, **59**(2): 163 – 173. [WANG Genxu, DING Yongjian, WANG Jian, et al. Land ecological changes and evolutionary patterns in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 15 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, **59**(2): 163 – 173] DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2004.02.001
- [28] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 等. 三江源植被净初级生产力估算研究进展[J]. 地理学报, 2016, **71**(9): 1596 – 1612. [SUN Qingling, LI Baolin, LI Fei, et al. Review on the estimation of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwater Region, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(9): 1596 – 1612] DOI: 10.11821/dlxb201609011
- [29] 徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 30 年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. 地理研究, 2008, **27**(4): 829 – 838. [XU Xinliang, LIU Jiyuan, SHAO Quanqin, et al. The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-River Headwaters Region in Qinghai province during recent 30 years [J]. Geographical Research, 2008, **27**(4): 829 – 838] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.04.011
- [30] 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[J]. 地理学报, 2013, **68**(7): 897 – 908. [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 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(7):897–908]

[31] 陈孝全, 苟新京. 三江源自然保护区生态环境[M]. 西宁: 青海

人民出版社, 2002: 15–20. [CHEN Xiaoquan, GOU Xinjing. *Eco-Environment in the natural conservation area of the Three-River Headwater Region* [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2002: 15–20]

Temporal and Spatial Changes in the Vegetation Cover (NDVI) in the Three-River Headwater Region, Tibetan Plateau, China under Global Warming

LI Weixiao^{1,2}, XU Jun^{1*}, YAO Yaqing¹, ZHANG Zhicai¹

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *Nanjing University Jinling College, Nanjing 210089, China*)

Abstract: The Three-River Headwater Region is regarded as a joint source area of the Yangtze River, the Yellow River and the Lancang River. It is located in the northeast part of the Tibetan Plateau, with a total area of 302 500 km² and an elevation of over 4000 m above sea level. For the purpose of environmental management and ecological civilization construction in the Three-River Headwater Region National Park, it is of great significance to study the temporal and spatial change process of vegetation cover in the Three-River Headwater Region for dealing with global warming effect. Previous studies discussed the ecological environmental changes in the Three-River Headwater Region from different perspectives; however, there were less concerns on the complex geographical environment, the ecosystem changes and their impacts. Moreover, little attention was paid to the changes in vegetation cover degree because of climate warming effect. In this study, NDVI data products from 2006 to 2015 were downloaded from the official website of NASA and it tried to reveal the temporal and spatial change patterns of surface vegetation and its influencing factors in the Three-River Headwater Region. The results find that: (1) NDVI featured in significant seasonal variation, and the annual variation trend of vegetation increased slightly towards improvement. (2) Regional differences in the vegetation cover suggested favorable conditions in the east and south of the region, but worse in the northwest. (3) The change of vegetation cover was mainly controlled by summer climatic conditions, which was related to climate warming and increase in regional precipitation, resulting in higher soil moisture. It is strongly advocated that the vegetation cover situation as “improving for whole region and deteriorating at local site” should be paid more attention. This study can provide a scientific basis for revealing changing processes and pattern of vegetation cover and the ecological restoration in the Three-River Headwaters Region.

Key words: the Three River Headwater Region; vegetation cover (NDVI); temporal and spatial change; soil moisture; the Tibetan Plateau