

2000—2015 年新疆伊犁河谷草地 NPP 时空变化特征

闫俊杰^{1,2,3}, 刘海军¹, 赵玉¹, 崔东¹, 刘影¹

(1. 伊犁师范学院生物与地理科学学院, 新疆 伊宁 835000;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以伊犁河谷为研究区,基于 Modis NPP 遥感数据,并借助于 GIS 空间分析及 Mann-Kendall 检验和 Theil-Sen median 趋势分析等方法,对伊犁河谷 2000—2015 年草地 NPP 的时空变化进行了分析。结果表明:(1) 伊犁河谷全区草地 NPP 多年平均值为 $272.99 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,大部分草地 NPP 值介于 $200 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,主要分布于河谷内的中山、高山及昭苏盆地等区域,各草地类型中山地草甸分布面积最广,NPP 平均值也最大;(2) 草地 NPP 总体呈非显著减少趋势,平均减小速率为 $0.94 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,空间上,全区 73.94% 草地的 NPP 出现不同程度的减少,减小速率主要介于 $1.0 \sim 5.0 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,类型主要属于山地草甸、温性草原及高寒草甸;(3) 伊犁河谷草地 NPP 减小速率总体随 NPP 的增加而逐步增大,但 NPP 值介于 $300 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的平均减小速率最大;(4) 海拔分异上, $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$ 海拔带内 NPP 减少最为明显,而 NPP 有所增加的草地主要分布于 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}$ 海拔带内。

关键词:NPP 时空变; Modis 数据; 草地; 伊犁河谷

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0390-07

Spatiotemporal Dynamics of Grassland Net Primary Productivity in Ili River Valley from 2000 to 2015

YAN Junjie^{1,2,3}, LIU Haijun¹, ZHAO Yu¹, CUI Dong¹, LIU Ying¹

(1. College of Biology and Geography, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Xinjiang Urumqi 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the Modis NPP remote sensing data, we analyzed the spatiotemporal dynamics of grassland NPP from 2000 to 2015 in Ili River Valley by means of GIS spatial analysis technology, Mann-Kendall test and Theil-Sen median trend analysis. The results showed that: (1) the annual grassland NPP of the whole Ili River Valley was $272.99 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; NPP of most part of the grassland in Ili River Valley was between $200 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and they mainly distributed at Zhaosu Basin, and the middle and high mountains around the valley; mountain meadow was the most widely distributed among all grassland types, and its average NPP was the highest; (2) NPP of grassland in Ili River Valley showed a non-significant decreasing trend in general, and the average decrease rate was $0.94 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; NPP of 73.94% grassland in the whole area decreased, and the decrease rate was mainly between $1.0 \sim 5.0 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; the types were mainly mountain meadow, warm steppe and alpine meadow; (3) generally speaking, the decrease rate of the grassland NPP in Ili River Valley increased gradually with the increase of NPP, and those ranging between $300 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ had the largest average decrease rate; (4) for the variation of the increase rate of grassland NPP along the elevation, the decrease of NPP in the $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$ elevation was the most obvious, and grassland with increasing NPP mostly distributed at the elevation of $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}$.

Keywords: spatioemporal dynamics of NPP; Modis data; grassland; Ili River Valley

随着全球变化问题研究的不断深入,植被与大气之间的相互作用过程逐步成为研究的热点^[1]。草地占据陆表 25% 的面积^[2],是全球分布最为广泛植被类型^[3],在气候调节以及全球碳循环中起着重要作

用^[4]。净初级生产力(net primary production, NPP)代表了单位面积绿色植被在单位时间内通过光合作用所生产的有机物量扣除自养呼吸消耗后的剩余部^[5],它不仅反映了植被在自然环境下的生产能力,

而且还是估算生态系统碳源/汇及判定生态系统功能状况的重要指标^[6],在全球气候变化背景下,研究草地植被 NPP 的时空变化特征,对掌握植被生态功能的演变规律及其对大气的反馈作用具有重要意义。

区域尺度上,估算模型与遥感数据相结合是目前 NPP 估算有效且被广泛采用的方法^[7-8]。国内外学者根据自身需求和侧重点,建立了多种 NPP 估算模型,如 NPP-EMSC、GLOPEM 及 CASA 等光能利用率模型,以及 TEM、BIOME-BGC 等生态系统过程模型^[9],这些模型的建立为区域 NPP 量化研究奠定重要基础,并被广泛应用于不同尺度植被 NPP 的估算和动态监测^[10-14]。起始于 2000 年的 MODIS NPP 时间序列数据是向全球公开发布的 NPP 成品数据,该数据基于 BIOME-BGC 模型及改进的 CASA 模型拟合制成^[15],包含在 MODIS MOD17A3 数据集内,目前已在全球不同区域 NPP 研究中得到验证和广泛应用^[7,15-16]。

我国草地广泛分布,西北干旱与半干旱区是其重要分布区,但该区干旱少雨,生态环境脆弱,对环境变化响应敏感,长期以来其植被、气候等环境变化被广泛关注^[17]。目前,已有相关学者对西北全区及内蒙古等区域 NPP 时空变化进行了相关研究^[18-19],但西北地区地域广阔,地形复杂,环境条件地域差异明显,以流域为单位,研究其 NPP 时空变化,对掌握西北地区草地生态 NPP 变化的空间分异特征具有重要意义。伊犁河谷位于新疆西北,祖国边陲,河谷内草地植被发育良好,分布高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、温性荒漠及低平地草甸等多种草地植被类型^[20],且其东、南和北三面被高山包围,西临国界,是一个独立而完整流域,同时该区受气候变化和人类影响,河谷内草地退化逐步加剧,环境恶化问题日趋严重,是西北草地生态的典型代表。

基于此,本文以伊犁河谷为研究区,基于 MODIS MOD17A3 数据,借助于 GIS 空间分析技术,分析其 NPP 时空变化特征,以期探明该区草地 NPP 的演变规律及其空间分异,为草地生态问题的治理提供科学参考。

1 研究区概况

伊犁河谷位于 80°09′42″—84°56′50″E,42°14′16″—44°53′30″N,地处我国西北边境,整个区域北、东、南三面环山,西临国界,构成一个独立的地域单元。河谷内高山、盆地及河谷平原相间分布,地形复杂,河流纵横。河谷气候属温带大陆性气候,但受地形影响,山区降水丰沛而气温偏低,平原降水稀少而

气温偏高^[21-22],水热条件的空间差异及多样变化为植被的多样性发育提供了良好条件,河谷内草地植被发育良好,是河谷生态主体,广阔且优质的草地使伊犁河谷成为我国西北乃至全国重要的畜牧基地。然则,随着伊犁河谷畜牧业的发展,人类活动对草地生态的干扰也不断增强,相继出现草地生产力降低及毒害草蔓延^[23]等方面的草地退化问题。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本文用到的 NPP 数据来自 MODIS MOD17A3 数据集,其空间分辨率为 1 000 m,时间分辨率为 1 a,时间序列为 2000—2015 年。该数据是基于 BIOME-BGC 模型及改进的 CASA 模型拟合制成 NPP 日数据后,再进一步合成 NPP 年数据。草地植被类型分布数据是在中国科学院中国植被图编辑委员会绘制的中国 1:100 万植被类型分布图的基础上,通过对伊犁河谷 2015 年 6—9 月 Landsat 8 OLI 影像的解译,剔除非草地类型后而获得,文章对该图中的草地类型进行了归类,划分为了高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、温性荒漠和低平地草甸 7 个类型。DEM 数据为美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合分布的 SRTM 数据,其空间分辨率为 90 m。

对获得的草地植被类型矢量图进行了栅格化处理,考虑到矢量图中斑块边界特征及数据量的大小,在栅格化的过程中将像元大小设置为了 250 m×250 m。对获得的 NPP 数据,除进行了镶嵌、转投影及研究区裁剪等操作外,为保证其与草地类型栅格数据的空间匹配,将其像元大小重采样为了 250 m×250 m。

2.2 趋势分析

利用 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen median 趋势分析来判断 NPP 时间序列的变化趋势,并对其变化速率进行量化^[24]。Mann-Kendall 检验的计算方法为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(NPP_k - NPP_i) \quad (2)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$\text{sign}(\text{NPP}_k - \text{NPP}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NPP}_k - \text{NPP}_i > 0 \\ 0 & \text{NPP}_k - \text{NPP}_i = 0 \\ -1 & \text{NPP}_k - \text{NPP}_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： NPP_k 和 NPP_i 为样本时间序列； n 为时间序列长度； sign 为符号函数。当 $|Z_c| > U_{1-\alpha/2}$ 时，表明在 α 水平上时间序列变化趋势显著。若统计量 Z_c 值为正，表示时间序列变化呈上升趋势，若统计量 Z_c 值为负，则变化趋势为减少。

Theil-Sen median 趋势分析用于对时间序列变化进行量化，表示单位时间内的变化量，其计算公式为：

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{\text{NPP}_i - \text{NPP}_j}{i - j}\right) \quad (5)$$

式中： $1 < j < i < n$ 。当 $\beta > 0$ 时，意味着时间序列呈上升趋势；反之，则呈减少趋势。

3 结果与分析

3.1 伊犁河谷 NPP 总体特征

利用 2000—2015 年 16 期草地 NPP 年空间分布数据，求出其多年平均数据，以多年平均数据来表示伊犁河谷草地 NPP 整体状况，并根据草地 NPP 空间分布及其直方图特征，对草地 NPP 进行等级划分(表 1)，制作伊犁河谷草地 NPP 等级类型空间分布图(图 1)，分析其空间分布特征。

伊犁河谷内，海拔及地形是影响水热资源配比及空间分布的重要因素，因而也是决定植被空间分布的重要因素。伊犁河谷草地 NPP 总体表现为山前洪积冲积扇区、低山丘陵区及高山区 NPP 相对较低 [$\text{NPP} < 300 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]，而中山区及山间盆地 NPP 相对较高 [$\text{NPP} > 300 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]。

根据表 1 中统计结果，伊犁河谷全区 NPP 多年平均值为 $272.99 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。各草地类型中山地草甸面积最大，其 NPP 也最高，为 $331.04 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，其 $\text{NPP} > 200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积占到全区草地面积的 38.27%；其次为温性草甸草原，其 NNP 为 310.65

$\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，但面积较小，其 $\text{NPP} > 200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积仅占全区草地面积的 5.63%；温性荒漠 NPP 最小，为 $144.14 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，其 86.43% 的区域 $\text{NPP} < 200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；剩余草地类型的 NNP 均介于 $200 \sim 300 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

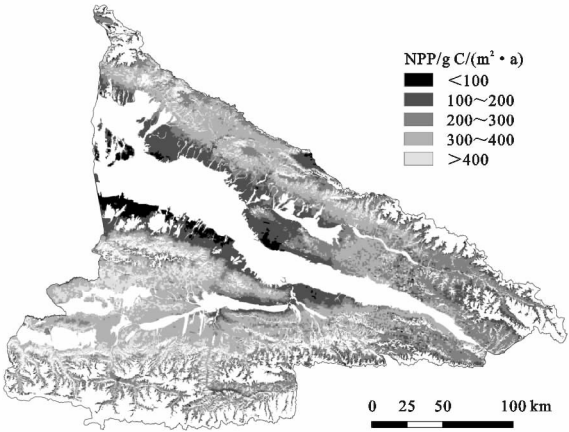


图 1 2000—2015 年伊犁河谷草地平均 NPP 空间分布

对于不同 NPP 等级，全区 NPP 介于 $300 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积比例最大，为 38.03%，其面积的 55.14% 为山地草甸，空间上主要分布于昭苏盆地及其周围，以及河谷中部、南部和北部的中山区；其次为 NPP 介于 $200 \sim 300 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 及 $100 \sim 200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的等级，其比例分别为 31.41% 和 20.73%，对于 NPP 介于 $200 \sim 300 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的等级，其面积的 69.85% 为高寒草甸和山地草甸，空间上主要分布在河谷东部及南部的高山区，而对于 NPP 介于 $100 \sim 200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的等级，其面积的 58.51% 则为温性荒漠类和高寒草甸，空间上主要分布在巩乃斯河下游、特克斯河下游、喀什河下游以及伊犁河两侧的洪积冲积扇区和低山丘陵区，海拔较高的高山区也有部分分布； $\text{NPP} > 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积比例为 6.34%，其面积的 54.57% 为山地草甸，空间上主要分布在昭苏盆地周围的中山区； $\text{NPP} < 100 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积比例最小，仅为 3.48%，其面积的 68.97% 为温性荒漠，空间上主要分布在伊犁河南部洪积冲积扇的前缘区。

表 1 伊犁河谷全区及不同草地类型 NPP 等级类型面积比例 %

| 草地类型 | 面积/ 10 ⁴ hm ² | NPP 平均值/ (g C · m ⁻² · a ⁻¹) | NPP 等级类型/(g C · m ⁻² · a ⁻¹) | | | | |
|---------|--|--|---|---------|---------|---------|------|
| | | | <100 | 100~200 | 200~300 | 300~400 | >400 |
| 高寒草甸类 | 50.70 | 228.85 | 0.78 | 5.27 | 7.23 | 2.53 | 0.42 |
| 山地草甸类 | 130.27 | 331.04 | 0.09 | 2.48 | 14.71 | 20.97 | 3.46 |
| 温性草甸草原类 | 18.74 | 310.65 | 0.03 | 0.46 | 1.06 | 3.34 | 1.10 |
| 温性草原类 | 52.28 | 293.26 | 0.05 | 2.87 | 4.75 | 8.09 | 0.99 |
| 温性荒漠草原类 | 24.50 | 255.63 | 0.09 | 2.52 | 2.29 | 2.68 | 0.27 |
| 温性荒漠类 | 33.46 | 144.14 | 2.40 | 6.86 | 1.15 | 0.29 | 0.01 |
| 低平地草甸 | 2.35 | 239.71 | 0.04 | 0.27 | 0.23 | 0.12 | 0.09 |
| 全区平均 | 312.30 | 272.99 | 3.48 | 20.73 | 31.41 | 38.03 | 6.34 |

3.2 伊犁河谷 NPP 变化趋势

借助于 IDL8.5 开发平台,分别计算 2000—2015 年伊犁河谷全区及各草地类型年 NPP 的空间平均值,并利用 Mann-Kendall 法与 Theil-Sen median 法来检验其变化趋势及量化其变化速率(图 2—3,表 2)。

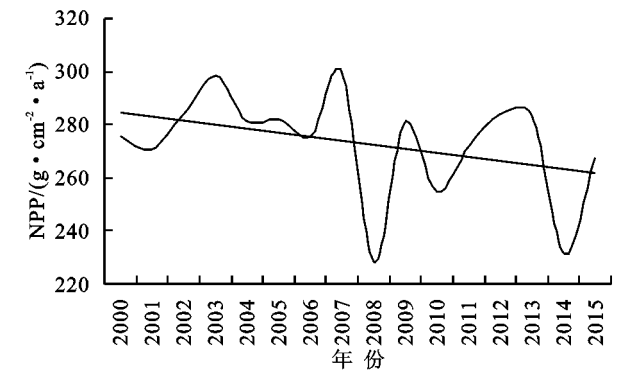


图 2 伊犁河谷全区草地 NPP 年际变化曲线

图 2 为伊犁河谷全区草地 NPP 的年际变化曲线,从图中可以看出,伊犁河谷草地 NPP 整体呈波动减少的变化趋势,于 2003 年、2007 年及 2013 年出现大的峰值,于 2008 年及 2014 年出现大的谷值,最高值出现在 2007 年,值为 $299.48\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,最小值出现在 2008 年,值为 $227.92\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。根据表 2 中的检验结果,全草地 NPP 年际变化率为 $-0.94\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,变化呈减少趋势,但未到达显著水平。

图 3 为伊犁河谷 7 种不同草地类型 NPP 的年际变化图,从图中可以看出,除高寒草甸外,其余 6 种年际波动与全区的平均特征相似。变化趋势上,7 种草地类型 NPP 年际变化均呈减少趋势,其中面积最大的山地草甸以及温性草原的减少趋势达到了显著水平(表 2),其余 5 种减少趋势均未通过显著检验。7 种草地类型中,温性荒漠草原与温性草原 NPP 变化速率最大,分别为 $-2.33\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-2.23\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,其次为山地草甸及低平地草甸,其变化速率分别为 $-1.98\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-1.26\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,高寒草甸、温性荒漠及温性草甸草原 NPP 变化率相对较小,分别为 $-0.85\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, $-0.67\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-0.50\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

表 2 伊犁河谷全区及各草地类型 NPP 变化率及变化趋势

| 草地类型 | β 值/ ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) | Z_c 值 | 趋势 | 显著性 |
|---------|--|---------|----|-----|
| 高寒草甸类 | -0.85 | -0.86 | 减少 | 不显著 |
| 山地草甸类 | -1.98 | -2.12 | 减少 | 显著 |
| 温性草甸草原类 | -0.67 | -0.77 | 减少 | 不显著 |
| 温性草原类 | -2.23 | -2.12 | 减少 | 显著 |
| 温性荒漠草原类 | -2.33 | -1.49 | 减少 | 不显著 |
| 温性荒漠类 | -0.50 | -1.22 | 减少 | 不显著 |
| 低平地草甸 | -1.26 | -1.40 | 减少 | 不显著 |
| 全区平均 | -0.94 | -0.95 | 减少 | 不显著 |

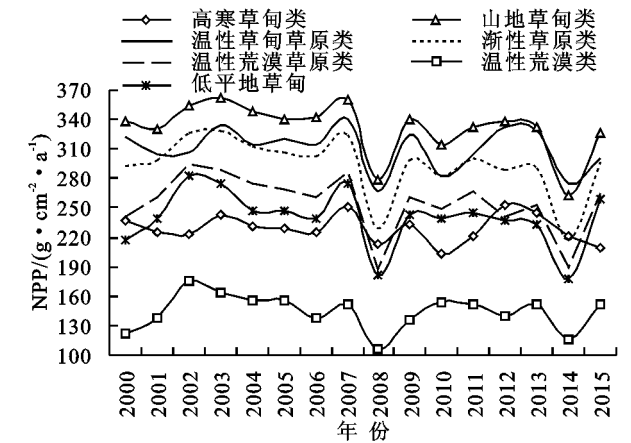


图 3 伊犁河谷各草地类型 NPP 年际变化

3.3 伊犁河谷 NPP 变化的空间特征

对 NPP 进行逐像元计算,检验其变化趋势,计算其变化速率,获得伊犁河谷草地 NPP Mann-Kendall 检验统计量 Z_c 值及年际变化速率 β 值空间分布数据,依据此数据,对其变化趋势及变化速率进行分类和划等,制作伊犁河谷草地 NPP 变化趋势及变化速率等级空间分布图(图 4—5)。

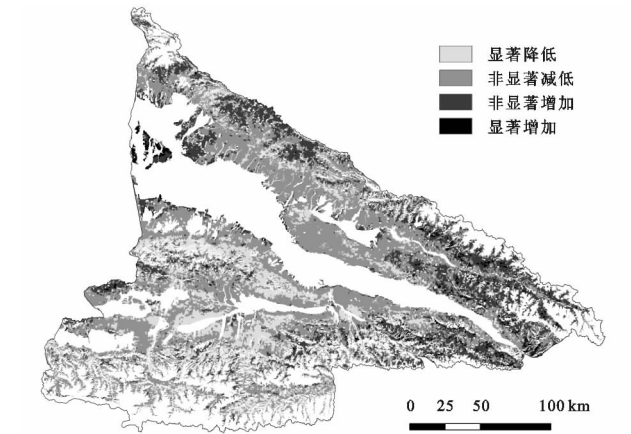


图 4 伊犁河谷草地 NPP 变化趋势空间分布

从图 4 中可以看出,与上述分析相一致,伊犁河谷绝大部分区域草地变化呈减少趋势,空间上主要分布在河谷南部那拉提山以西区域,以及北部山前洪积冲积扇及低山丘陵区,全区草地 NPP 呈减少趋势的比例达到了 73.95%,草地类型主要为山地草甸、温性草原及高寒草甸,其中山地草甸所占比例最高,达到了 26.99%;但同时也应看到,NPP 减少趋势达到显著水平的比例仅为 13.52%,主要分布在特克斯河中游两侧的中山区及乌孙山北坡的部分区域。全区草地 NPP 呈增加趋势的比例为 26.05%,但达到显著水平的比例仅为 1.75%,空间上仅零星分布于河谷东部及伊犁河下游末端的平原区;未达到显著水平的比例为 24.30%,主要为山地草甸和高寒草甸,空间上分布于河谷东部及北部的中山和

高山区。

对于 NPP 变化率等级的空间分布,从图 5 可以看出,降低速率 $>1.0\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区域占了很大比例,其比例为 51.99%,草地类型上主要为山地草甸、温性草原及高寒草甸。对于 NPP 呈增加趋势的草地,其增加速率多介于 $0\sim2.5\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,面积占全区草地总面积的 24.34%,草地类型主要属于山地草甸和高寒草甸;增加速率 $>2.5\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的草地占全区的比例仅为 4.00%,空间上仅在河谷东部及西北部的中山区有所分布。而对于 NPP 有所降低的区域,其降低速率主要介于 $0\sim5.0\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,比例为全区的 67.26%;NPP 降低速率 $>5.0\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的比例仅为 4.40%,空间上主要分布在 NPP 发生显著降低的区域内。

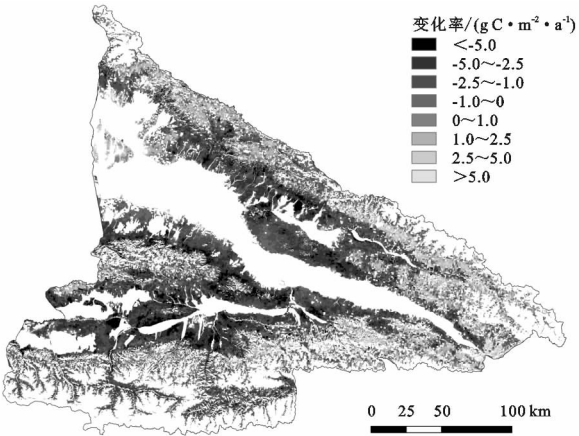


图 5 伊犁河谷草地 NPP 变化率等级空间分布

4 讨论

4.1 NPP 变化速率与 NPP 大小关系

由上述分析可以看出,不仅各草地类型的 NPP 变化率不同,不同大小的 NPP 的变化速率也有所差异,因此基于伊犁河谷多年平均 NPP 及 NPP 变化速率的空间分布数据,制作 NPP 等级与 NPP 变化率等级矩阵表(表 3),分和讨论 NPP 变化速率与 NPP 大小关系。

NPP 的减小速率随 NPP 的增加总体呈现逐步增大的变化特征,其中 $\text{NPP}>300\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 段表现最为明显。各 NPP 等级中,等级为 $300\sim400\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的面

积最大,同时也是 NPP 的减小速率最大的区域,根据表 3 中统计结果,其 NPP 呈减少趋势的面积比例占到总草地面积的 29.30%,其中其 NPP 减小速率 $>5.0\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 及介于 $2.5\sim5.0\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的比例分别占到全区草地总面积的 2.89%和 11.18%,远高于其他等级;同时,NPP 等级为 $300\sim400\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 且变化呈减少趋势的面积比例也占到草地总面积的 20.17%,但其减小速率总体小于 NPP 等级为 $300\sim400\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区域。此外,从表 3 中还可以看出在 $\text{NPP}<400\text{ g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的范围内,NPP 呈减少趋势的各变化率等级的面积比例随 NPP 等级的增大也逐步增加,进一步验证了 NPP 减小速率随 NPP 的增大而增大的变化特征。

4.2 NPP 变化的海拔分异

伊犁河谷植被垂直地带性特征明显,利用全区 MED 数据及 NPP 变化率数据,制作海拔带与 NPP 变化率等级矩阵表(表 4),分析和讨论 NPP 变化的海拔分异特征。

由表 4 可知,伊犁河谷绝大部海拔上的 NPP 均呈减少趋势,且不同海拔高度 NPP 变化率也存在一定差异,其中 $1\,000\sim1\,500\text{ m}$ 及 $1\,500\sim2\,000\text{ m}$ 两个海拔带内 NPP 减少最为明显,减少速度最大的海拔高度出现在 $1\,500\sim2\,000\text{ m}$ 海拔带。 $1\,500\sim2\,000\text{ m}$ 及 $1\,000\sim1\,500\text{ m}$ 海拔带内的草地面积分别占到全区草地总面积的 29.35%和 19.88%,而其 NPP 呈减少趋势的面积比例也分别达到全区草地总面积的 24.66%和 18.11%,表明两个海拔带内分别有 84.02%和 91.10%草地的 NPP 发生减少。海拔升高到 $2\,250\text{ m}$ 后,NPP 的平均变化率趋于平稳,其值也接近于 0,这主要是因为 NPP 呈增加趋势的面积比例有了较大提高,根据表 4 中统计, $2\,000\sim3\,500\text{ m}$ 的 3 个海拔带内草地面积占全区草地总面积的 42.54%,其中 NPP 呈增加趋势的草地面积占到全区草地总面积的 18.39%,表明该海拔带内 43.23%区域的草地 NPP 有所增加,尤其是 $2\,000\sim2\,500\text{ m}$ 及 $2\,500\sim3\,000\text{ m}$ 两个海拔带。

表 3 伊犁河谷 NPP 等级与 NPP 变化率等级矩阵 %

| NPP 等级/ ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) | NPP 变化速率等级/($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) | | | | | | | |
|---|---|----------------|----------------|-------------|------------|--------------|--------------|--------|
| | <-5.0 | $-5.0\sim-2.5$ | $-2.5\sim-1.0$ | $-1.0\sim0$ | $0\sim1.0$ | $1.0\sim2.5$ | $2.5\sim5.0$ | >5.0 |
| <100 | 0 | 0.01 | 0.41 | 1.61 | 1.18 | 0.22 | 0.04 | 0.01 |
| $100\sim200$ | 0.21 | 2.87 | 6.24 | 5.32 | 3.57 | 1.74 | 0.63 | 0.14 |
| $200\sim300$ | 0.93 | 5.33 | 7.77 | 6.14 | 4.94 | 4.27 | 1.83 | 0.20 |
| $300\sim400$ | 2.89 | 11.18 | 9.78 | 5.45 | 4.10 | 3.51 | 1.08 | 0.05 |
| >400 | 0.37 | 1.87 | 2.11 | 1.15 | 0.54 | 0.27 | 0.03 | 0 |
| 合计 | 4.4 | 21.26 | 26.32 | 19.67 | 14.33 | 10.02 | 3.59 | 0.41 |

表 4 海拔带与 NPP 变化率等级矩阵 %

| 海拔带/m | NPP 变化速率等级/ $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ | | | | | | | | 共计 |
|-----------|--|------------------|------------------|---------------|--------------|----------------|----------------|--------|--------|
| | <-5.0 | $-5.0 \sim -2.5$ | $-2.5 \sim -1.0$ | $-1.0 \sim 0$ | $0 \sim 1.0$ | $1.0 \sim 2.5$ | $2.5 \sim 5.0$ | >5.0 | |
| <1000 | 0.08 | 0.58 | 1.51 | 2.13 | 1.65 | 1.00 | 0.44 | 0.15 | 7.54 |
| 1000~1500 | 0.98 | 6.18 | 7.65 | 3.30 | 1.17 | 0.48 | 0.11 | 0.01 | 19.88 |
| 1500~2000 | 2.60 | 9.61 | 8.29 | 4.16 | 2.49 | 1.55 | 0.58 | 0.07 | 29.35 |
| 2000~2500 | 0.58 | 3.00 | 3.40 | 2.82 | 2.75 | 3.33 | 1.61 | 0.15 | 17.63 |
| 2500~3000 | 0.14 | 1.53 | 3.17 | 3.76 | 3.69 | 2.91 | 0.79 | 0.03 | 16.02 |
| 3000~3500 | 0.02 | 0.36 | 2.19 | 3.18 | 2.34 | 0.72 | 0.06 | 0.00 | 8.89 |
| >3500 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.32 | 0.24 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.69 |
| 合计 | 4.40 | 21.26 | 26.32 | 19.67 | 14.33 | 10.02 | 3.59 | 0.41 | 100.00 |

5 结 论

(1) 伊犁河谷全区草地 NPP 多年平均值为 $272.99 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 全区 69.44% 草地的 NPP 介于 $200 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 空间上分布于河谷北、东和南三面的中山和高山以及乌孙山和昭苏盆地, 草地类型主要属于山地草甸、高寒草甸及温性草原; NPP $<200 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积比例为 24.21%, 巩乃斯河下游至伊犁河出境口一线两侧的洪积冲积扇和低山丘陵是其集中分布区, 类型以温性荒漠和高寒草甸居多; NPP $>400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积比例为 6.34%, 主要分布在乌孙山南麓及昭苏盆地周边, 草地类型主要属于山地草甸。

(2) 就平均情况来看, 伊犁河谷草地 NPP 整体呈现非显著的减少趋势, 平均减少速率为 $0.94 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 各类型草地的 NPP 也均呈减少的变化趋势, 但仅有面积最大的山地草甸以及温性草原的减少趋势达到了显著水平, 减少速率以温性荒漠草原与温性草原为最大, 分别为 $2.33 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $2.23 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 以及高寒草甸、温性荒漠及温性草甸草原为最小, 其减小速率均 $<1 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

(3) 空间上, 伊犁河谷绝大部分区域草地 NPP 变化呈减少趋势, 全区草地 NPP 呈减少趋势的比例达到了 73.94%, 草地类型以山地草甸、温性草原及高寒草甸为主, 减小速率多介于 $1.0 \sim 5.0 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 空间上主要分布在河谷南部那拉提山以西区域, 以及北部山前洪积冲积扇及低山丘陵区; NPP 呈增加趋势的草地以山地草甸和高寒草甸为, 增加速率多介于 $0 \sim 2.5 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 空间上主要分布在河谷东部及北部的中山和高山区。

(4) 对于 NPP 变化率随 NPP 的变化, NPP 的减小速率总体随 NPP 的增加而逐步增大, 但 NPP 介于 $300 \sim 400 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的平均减小速率最大。

(5) 而对于海拔分异, 绝大部分海拔上的 NPP 呈减少趋势, 而 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$ 海拔带内 NPP 减少最为明显, 减少速度最大的海拔带为 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m}$, 而 NPP 有所增加的草地多位于 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}$ 海拔带内。

参考文献:

[1] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2005,20(9):503-510.

[2] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration[J]. Grassland Science, 2007,53(1):1-17.

[3] Yang Y, Wang Z, Li J, et al. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013[J]. Journal of Arid Environments, 2016,135:164-172.

[4] Liang T, Feng Q, Yu H, et al. Dynamics of natural vegetation on the Tibetan Plateau from past to future using a comprehensive and sequential classification system and remote sensing data[J]. Grassland Science, 2012,58(4):208-220.

[5] Potter C S, Klooster S, Brooks V. Inter annual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales[J]. Ecosystems, 1999,2(1):36-48.

[6] 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.

[7] 刘丹,于成龙. 基于 MODIS 的东北三省植被 NPP 潜在气候生产力估算[J]. 水土保持研究, 2017,24(4):315-323.

[8] Zhang M, Lal R, Zhao Y, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of grassland in China and its relation to climate factors[J]. Plant Ecol-

- ogy, 2017, 218(9):1117-1133.
- [9] 张懿铨, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力 (NPP) 时空分异[J]. 地理学报, 2013, 68(9):1197-1211.
- [10] 赵国帅. 基于光能利用率模型的青海植被净初级生产力模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [11] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于 NPP 的黄南州自然植被对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6):1094-1102.
- [12] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等. 基于光能利用率模型的松嫩平原玉米单产估算[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 385-390.
- [13] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. 地理学报, 2004, 59(1):74-79.
- [14] 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等. 基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4):512-518.
- [15] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17 A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2776-2782.
- [16] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3/4):282-292.
- [17] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6):1665-1670.
- [18] 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[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1):181-189.
- [19] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 等. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究[J]. 地理研究, 2016, 35(2):271-284.
- [20] 刘芳, 张红旗, 董光龙. 伊犁河谷草地植被 NDVI 变化及其降水敏感性特征[J]. 资源科学, 2014, 36(8):1724-1731.
- [21] 张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J]. 干旱气象, 2006, 24(2):1-4.
- [22] 赵丽, 杨青, 韩雪云. 1961—2009 年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10):82-89.
- [23] 郭彦玮. 新疆草原生态保护补助奖励政策实施效果及其对策研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- [24] Jiang W, Yuan L, Wang W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51:117-126.
- ~~~~~

(上接第 389 页)

- [5] 周玲玲, 王琳, 余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系: 以即墨市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 913-921.
- [6] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3):342-349.
- [7] 贾学秀, 严岩, 朱春雁, 等. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10):1783-1791.
- [8] 张新娇, 唐德善, 孙学颖. 基于 AHP 与模糊综合评价法的水资源高效管理评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5):133-136.
- [9] 何国华, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2):214-220.
- [10] 崔莹, 谢世友, 柳芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4):115-123.
- [11] 秦鹏, 王英华, 王维汉, 等. 河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(12):2169-2175.
- [12] 袁艳梅, 沙晓军, 刘煜晴, 等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1):52-56.
- [13] 高晓薇, 刘元元, 戴纪翠, 等. 深圳河健康状况诊断及分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(4):636-642.