

2004—2015 年贺兰山自然保护区植被 NPP 时空变化与气候响应

李婷婷¹, 马超^{1,2}, 郭增长^{2,3}

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003; 2.河南理工大学 自然资源部
矿山时空信息与生态修复重点实验室, 河南 焦作 454003; 3.河南测绘职业学院, 郑州 451464)

摘 要:为了揭示宁夏贺兰山自然保护区长时序植被初级净生产力(NPP)变化与气候相关性,基于 MOD17A3H NPP 数据、SRTM DEM 数据和中国气象数据,定量分析了 2004—2015 年宁夏贺兰山自然保护区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的响应。结果表明:(1) 2004—2015 年研究区植被平均 NPP 为 $97.91 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,增长速率为 $0.28 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,12 a 间植被总 NPP 变化范围为 $0.32 \sim 0.50 \text{ Tg C/a}$ 。(2) 植被 NPP 具有较强的空间分异性。水平地带性表现为 NPP 总量整体北部优于南部($0.0425 \text{ Tg C} > 0.0316 \text{ Tg C}$),东部优于西部($0.0145 \text{ Tg C} > 0.0073 \text{ Tg C}$);垂直地带性表现为 NPP 值呈现针叶林—阔叶林—灌木—草原—荒漠的垂直景观结构变化,NPP 高值集中分布在海拔 2 500 m 以上的高海拔地区。(3) 研究区气候呈冷湿化趋势,气温变化率为 -0.01°C/a ,降水变化率为 2.77 mm/a 。植被 NPP 变化与年降水量呈显著正相关($r=0.6468$, $p<0.05$),其中草原和灌木区的植被 NPP 对降水量响应最强。宁夏贺兰山自然保护区生态结构虽存在缓慢变好趋势,但森林生态系统仍极端脆弱,生态保护工作任重道远。

关键词:宁夏贺兰山自然保护区; 植被净初级生产力(NPP); 生态剖面; 生物量; 气候变化

中图分类号:Q948; P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0254-08

Response of Spatiotemporal Change of NPP to Climate in Helanshan Mountain Nature Reserve from 2004 to 2015

LI Tingting¹, MA Chao^{1,2}, GUO Zengzhang^{2,3}

(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2.Key Laboratory of Spatiotemporal Information and Ecological Restoration of Mines, MNR, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 3.Henan College of Surveying and Mapping, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: In order to reveal the correlation between the change of net primary productivity (NPP) and climate in Helanshan Mountain Nature Reserve of Ningxia, spatial and temporal variation of vegetation NPP and its response to climate over Helanshan Mountain Nature Reserve of Ningxia from 2004 to 2015 was quantitatively analyzed on the basis of MOD17A3H NPP data, SRTM DEM data and China Meteorological data. The results showed that: (1) from 2004 to 2015, the average vegetation NPP in the study area was $97.91 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; the growth rate of vegetation NPP was $0.28 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; the total NPP variation range was $0.32 \sim 0.50 \text{ Tg C/a}$ during research period; (2) vegetation NPP had strong spatial heterogeneity; the horizontal zonality analysis indicated that total NPP in the north was better than that in the south ($0.0425 \text{ Tg C} > 0.0316 \text{ Tg C}$), and that in the east was better than that in the west ($0.0145 \text{ Tg C} > 0.0073 \text{ Tg C}$); and the vertical zonality analysis indicated that the NPP had characteristics of vertical landscape structure change of coniferous forest-broadleaf forest-shrub-grassland-desert; the high NPP mainly distributed in area above the altitude of 2 500 m; (3) the change trend of climate over study area was from cold to humidification, the annual change rate of temperature was -0.01°C , and the annual change rate of precipitation was 2.77 mm ; the vegetation NPP had a significant positive correlation with annual precipitation ($r=0.6468$, $p<0.05$), in detail,

收稿日期:2019-11-18

修回日期:2019-12-16

资助项目:国家自然科学基金(41975036);河南理工大学创新型科研团队项目(T2018-4)

第一作者:李婷婷(1992—),女,山西临汾人,博士研究生,研究方向为生态环境遥感。E-mail:970712067@qq.com

通信作者:马超(1967—),男,内蒙古克什克腾旗人,教授,博导,主要从事自然灾害遥感、生态环境遥感研究。E-mail:mac@hpu.edu.cn

vegetation NPP of grassland and shrub area had the strongest response to precipitation. Although the ecological structure of Helanshan Mountain Nature Reserve of Ningxia had the slowly improving trend, the forest ecosystem was still extremely fragile. The ecological protection work will have a long way to go.

Keywords: Helanshan Mountain Nature Reserve; Ningxia; net primary productivity; ecological profile; biomass; climate change

联合国大会于 2015 年 9 月 25 日一致通过了题为“改变我们的世界:2030 年可持续发展议程”的第 70/1 号决议,将保护、恢复和促进生态系统可持续发展(目标 15)列入全球 17 项可持续发展目标^[1]。目标 15 具体侧重于可持续地管理森林、恢复退化的土地和成功防治荒漠化、减少退化的自然生境和结束生物多样性丧失。基于遥感技术的长时序变化监测和评估研究,可明确生态变化趋势,提升地方政府实施、监督和评估可持续发展目标的能力,为“中国落实 2030 年可持续发展议程进展报告”提供数据参考^[2]。

在研究生态系统对全球变化的影响、响应和对策中,植被净初级生产力成为一项不可或缺的指标和核心内容^[3]。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是绿色植物总初级生产力(在单位时间和单位面积上通过光合作用产生的全部有机物同化量)扣除自养呼吸后的剩余部分^[4]。NPP 表示植物光合作用产物固定和转化的效率,直接反映植物在自然环境条件下的生产能力,是评价生态系统结构与功能协调及生物圈人口承载力的状况指标^[5]。祝萍等^[6]将植被 NPP 作为评价指标对中国典型国家级自然保护区生境状况时空变化特征进行研究。张镔铨等^[7]将青藏高原自然保护区的植被 NPP 变化过程数据与其相邻等面积区域的植被 NPP 变化差异进行对比分析,评估自然保护区的保护成效。王培娟等^[8]针对长白山自然保护区植被 NPP 主要影响因子的敏感性进行研究。可见在对自然保护区生态系统的变化检测和评估研究方面,植被 NPP 已成为一项重要指标。

中国境内山脉众多,其中不乏名山,但能以大尺度地理界线闻名者寥寥无几,贺兰山幸为其中之一^[2]。贺兰山是中国北方干旱地理带的一片绿洲,是宁夏平原的气候屏障和区域生态环境变化的指示器,其生态走向关乎濒危物种的延续与北方干旱荒漠带宁夏段的生态平衡。植被作为干旱区敏感的环境因素,植被覆盖变化的研究已成为揭示干旱区自然环境变化及其规律的重要手段^[9]。周梦云等^[10]对宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化进行研究。刘胜涛等^[11]对宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气的环境功能进行研究。顾延

生等^[12]对贺兰山中段植被类型及其覆盖变化进行研究。通过文献调研发现,以往的研究多集中于对贺兰山植被进行某些特定生理特征的研究,而没有对贺兰山地区的植被生物量时空变化同气候变化相结合,获得区域生态演化规律。

由于贺兰山自然保护区的局部山地效应,使对该区气候与植被的相关研究变得意义非凡。研究贺兰山自然保护区植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的响应关系,可为地方政府提供区域植被生理状况和生产能力的的相关信息,对荒漠化生态治理、自然保护区的管理、生态状况评价和促进社会经济可持续发展提供参考依据。

1 研究区概况

宁夏贺兰山为西北为数不多的森林分布区之一,既是荒漠区与荒漠草原区的分界线,又是干旱区与半干旱区的分界线,具有涵养水源和调节气候的作用^[11]。由于其地理位置的特殊性和生态系统的脆弱性,早在 20 世纪 80 年代就已被列为国家级生态保护区。(贺兰山的管理机构始建于 1950 年。1982 年 7 月 1 日,宁夏人大划定贺兰山为省级自然保护区,1988 年 5 月国务院批准宁夏贺兰山自然保护区晋升为国家级自然保护区。)

以 1 500 m 等高线为基准,并向外延伸 1 km 来确定研究区的边界范围(图 1A)。研究区地处宁夏贺兰山自然保护区核心区,近南北走向,西邻阿拉善高原,东接银川平原。地理坐标为北纬 38°07′—39°32′,东经 105°17′—106°40′,南北长 157.63 km,东西宽 120.40 km,面积 5 769.25 km²,海拔为 1 168~3 497 m。

宁夏贺兰山是我国东西部气候的分界,属季风气候向大陆性气候的过渡,也是我国 200 mm 等降水量线所经过的地区^[12]。年均气温 6~8℃,寒暑变化强烈,年均降水 176.4~313.0 mm,全年干旱少雨。

贺兰山因海拔高,地势东缓西陡,导致自然气候产生显著垂直分异,构成独特的干旱区山地植被垂直带,孕育出荒漠草原,耐旱乔木、灌木,油松、山杨林和青海云杉等植被类型^[13],利用中国 1:100 万植被类型空间分布图将研究区的植被类型进行合并,得到宁夏贺兰山植被类型空间分布(图 1B)。

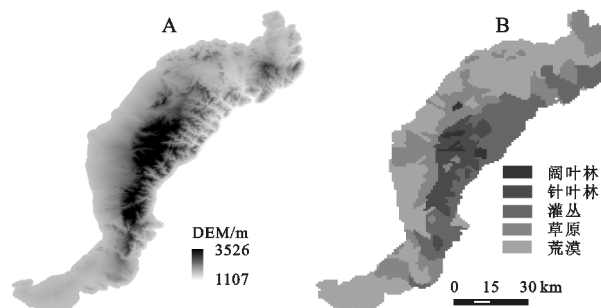


图 1 宁夏贺兰山的地形与植被分布

2 数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 数据来源与处理 表达植物在自然环境下的生产能力的植被净初级生产力 NPP 数据,源于美国一级大气存档和分布式数据发布中心 (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center, LAADS DAAC), 研究选取 2004—2015 年的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro radiometer) 数据产品: MOD17A3H NPP 数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), 其空间分辨率为 500 m, 主要用于研究 NPP 的变化与气候响应的关系。该 NPP 数据是基于 MODIS/TERRA 卫星的遥感参数, 通过利用 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型建立的 NPP 估算模型模拟得到全球陆地植被净初级生产力年际变化数据集, 目前已在全球不同区域的植被生长状况、生物量估算、环境变化检测等研究中得到验证和广泛应用^[14-15]。利用 MODIS 数据重投影工具 MRT (Modis Reprojection Tool) 将 NPP 数据定义为 UTM 投影, WGS_84 椭球的地理数据, 用于分析 2004—2015 年贺兰山植被 NPP 变化特征。

高程数据源于美国太空总署 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合测量的航天飞机雷达地形测绘使命数字高程模型 (SRTM3 DEM, <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>), 水平分辨率为 90 m, 主要用于以 1 500 m 等高线来划定研究区范围。

气象数据源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 分别为 2004—2015 年年降水量空间插值数据集, 用于分析降水量对植被 NPP 的影响; 2004—2015 年年平均气温空间插值数据集, 用于分析气温对植被 NPP 的影响。

植被类型空间分布数据源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>) 1:100 万中国植被图, 通过 ArcGIS 对研究区植被类型空间分布图进行投

影变换, 将植被类型合并为阔叶林、针叶林、灌丛、草地和荒漠这 5 种, 为植被 NPP 阈值分割提供基础参考。

2.1.2 数据质量验证 研究区属国家级自然保护区, 大范围实地调查难以实施, 加之研究时间序列长 (12 a), 生物量分布的时间和空间异质性大, 通过有限的实地调查所获得的平均生物量来推算整个研究区的生物量也会存在较大误差。针对类似情况, 已有研究者^[16]将 NPP 估算结果与土地利用分类数据产品进行对比, 通过局部土地利用变化趋势来验证整体精度, 具有片面性。本文在研究区均匀选择 120 个样本点, 利用遥感数据产品 MOD13A1, 通过将样本点 12 a 的平均 NPP 与平均 NDVI 做对比来验证精度, 检验结果显示二者具有非常高的拟合度 ($r=0.944$, $p<0.01$), MOD17A3H NPP 数据质量可靠。

2.2 研究方法

2.2.1 偏差分析 平均 NPP 是基于像元对多年 NPP 数据进行计算求得的平均值, 用于得到研究区多年的平均 NPP 空间分布图, 其计算公式如下:

$$\overline{\text{NPP}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n} \quad (1)$$

式中: $\overline{\text{NPP}}$ 为多年 NPP 平均值; n 为年数 (时间序列为 2004—2015 年, 即 $n=12$); NPP_i 为某一像元点第 i 年的 NPP 值。

偏差反映某时间段内 NPP 偏离多年 NPP 均值的程度, 即某段时间内 NPP 的盈亏情况^[17]。其计算公式如下:

$$d_{\text{NPP}} = \text{NPP}_i^n - \overline{\text{NPP}} \quad (2)$$

式中: d_{NPP} 为 NPP 的偏差值; NPP_i^n 为在 n 年中的第 i 年的总 NPP 值; $\overline{\text{NPP}}$ 为 n 年总 NPP 的平均值。

2.2.2 相关性分析 相关性分析^[18]可以反映要素之间的相关程度和相关方向, 本文采用 Pearson 相关系数法对植被年 NPP 与气温、降水量的响应关系进行研究, 其计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为 x, y 变量的相关系数; n 为年数 (时间序列为 2004—2015 年, 即 $n=12$); x_i, y_i 分别为 x, y 两变量第 i 年的值; \bar{x}, \bar{y} 分别为 x, y 两变量 n 年的平均值。

2.2.3 趋势分析 一元线性回归法^[17]可以对研究数据进行趋势分析, 得到其变化速率, 本文采用一元线性回归分析法对研究区总 NPP、气温和降水量进行研究, 其计算公式如下:

$$Y_i=\beta_0X_i+\beta_1$$

(4)

式中: Y_i 为因变量; X_i 为自变量; β_0 为斜率; β_1 为一随机变量。

$$\beta_0=\frac{n\cdot\sum_{k=1}^n(k\cdot X_k)-\sum_{k=1}^nk\sum_{k=1}^nX_k}{n\cdot\sum_{k=1}^nk^2-(\sum_{k=1}^nk)^2}$$

(5)

式中: β_0 为变化速率; n 为年数(时间序列为 2004—2015 年,即 $n=12$); k 为时间序列; X_k 为第 k 年的自变量。

3 结果与分析

3.1 MODIS NPP 分类处理

通过对 2004—2015 年的 NPP 数据进行计算,得到贺兰山 12 a 的平均 NPP 空间分布图(图 2)。依据贺兰山自然保护区主要植被类型的空间分布情况和 NPP 数值的对应关系,将研究区划分荒漠、草原、灌丛、针叶林、阔叶林 5 个等级,其分别对应 NPP 阈值为 $[0,65]$, $(65,85]$, $(85,150]$, $(150,250]$, $(250,500]$,单位为 $\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[13]。

12 年的 NPP 均值分割图显示出贺兰山自然保护区生态系统的景观结构,植被 NPP 由外向内逐渐

递增,即从低山浅山的荒漠草原带,到中低山区的灌丛林带,再到高海拔山区的针阔混交林带,植物按海拔垂直分布的层次明显,构成了当地典型的山地生态景观。其景观辨识度优于 1:100 万中国植被覆盖专题图。

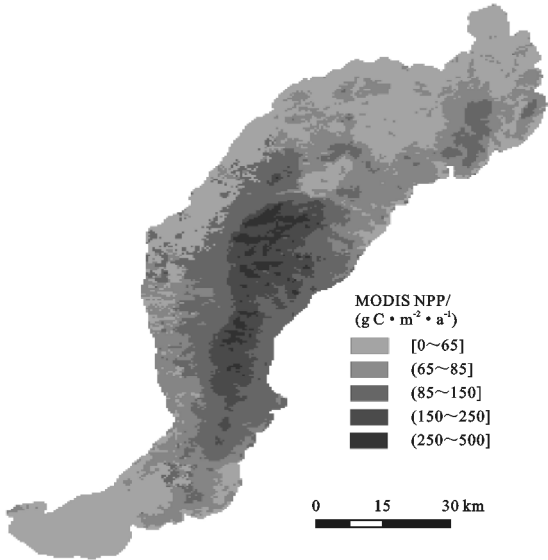


图 2 2004—2015 年平均 NPP 密度分割图

3.2 MODIS NPP 时间变化分析

研究对贺兰山自然保护区 2004—2015 年植被初级净生产力(NPP)进行了统计分析(表 1)。

表 1 植被净初级生产力(NPP)统计

年份	各 NPP 区间像素数/个					平均 NPP/ ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	总 NPP/ ($\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$)	总 NPP 偏差/ ($\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$)
	[0,65]	(65,85]	(85,150]	(150,250]	(250,500]			
2004	10007	3479	6167	2422	1002	81.64	0.4711	0.0601
2005	16949	1618	2718	1790	2	56.23	0.3244	-0.0865
2006	13771	2724	3885	2152	545	70.01	0.4039	-0.0070
2007	11839	3359	5206	2486	187	72.80	0.4200	0.0091
2008	12644	3184	4851	2206	192	70.27	0.4054	-0.0055
2009	12786	3606	4201	2313	171	69.45	0.4007	-0.0102
2010	12378	3844	4401	2260	194	70.02	0.4040	-0.0069
2011	14290	3038	3573	1731	445	65.52	0.3780	-0.0329
2012	8841	2913	7331	3075	917	86.93	0.5015	0.0906
2013	12443	3470	4402	2339	423	71.61	0.4131	0.0022
2014	12337	2886	5010	2095	749	73.85	0.4261	0.0152
2015	14270	2993	3424	1964	426	66.35	0.3828	-0.0281
12 a 均值	12713	3093	4597	2236	438	71.22	0.4109	

NPP 区间在 $[0,65]$ 的荒漠面积占比总体呈波动性减少的趋势,荒漠面积在 2005 年、2011 年和 2015 年荒漠面积达 3 500 km^2 以上,占研究区总面积的 60% 左右。12 a 间荒漠面积占比的最大变幅为 35.13%;NPP 区间在 $(65,85]$ 的草原面积占比总体呈波动性增加的趋势,草原面积在 2010 年达到 961 km^2 ,占研究区面积的 16.66%。12 a 间草原面积占比的最大变幅达 9.65%;NPP 区间在 $(85,150]$ 的灌丛面积占比总体呈波动增加的趋势,灌丛面积在 2012 年达到最大值 1 832.75 km^2 ,占研究区面积的 31.77%。12 a 间灌丛

面积占比的最大变幅达 19.99%;NPP 区间在 $(150,250]$ 的针叶林面积占比较为平稳,约 768.75 km^2 ,占研究区面积的 13.32%。12 a 间针叶林面积占比的最大变幅为 5.82%;NPP 区间在 $(250,500]$ 的阔叶林面积占比最少,且波动变化较大,整体呈增加趋势。阔叶林面积达 225 km^2 以上,占研究区总面积的 4% 左右。12 a 间阔叶林面积占比的最大变幅为 4.33%。

2004—2015 年研究区植被 NPP 均值为 71.22 $\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,同期全国植被年平均 NPP 值 273.5 $\text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[19],研究区植被 NPP 均值仅为同期全

国植被年平均 NPP 值的 26.04%; 植被总 NPP 变化范围为 0.324 4~0.501 5 Tg C/a, 波动幅度达 154.6%, 总体在变化区间 0.177 1 Tg C/a 以内呈缓慢增加趋势; 植被总 NPP 增长速率为 0.281 6 g C/(m²·a), 远低于同期全国植被 NPP 增长率 1.141 5 g C/(m²·a)^[19]。偏差分析得到总 NPP 偏差值在 12 a 中有 7 a 低于平均水平, 出现生态亏缺的年份多于生态盈余。

3.3 MODIS NPP 空间变化分析

3.3.1 苏峪口国家森林公园剖面水平地带性变化

苏峪口国家森林公园是贺兰山自然保护区植被覆

盖较好的区域, 区内设有贺兰山森林生态系统定位观测研究站, 研究其生态剖面对认识整个自然保护区生态演化具有代表性。以苏峪口国家森林公园核心区中点(东经 105°54′60.00″, 北纬 38°42′53.96″)为原点, 设置 W—E 和 N—S 两个剖面, 分析核心区两个地理方位的植被生产力变化, 可以形成二维的时空变化晕渲图(图 3), 图中黑色实横线位置为苏峪口国家森林公园核心区中点位置所在, 在 W—E 剖面上像素点的位置为 28 pixel, 在 N—S 剖面上像素点的位置为 77 pixel。

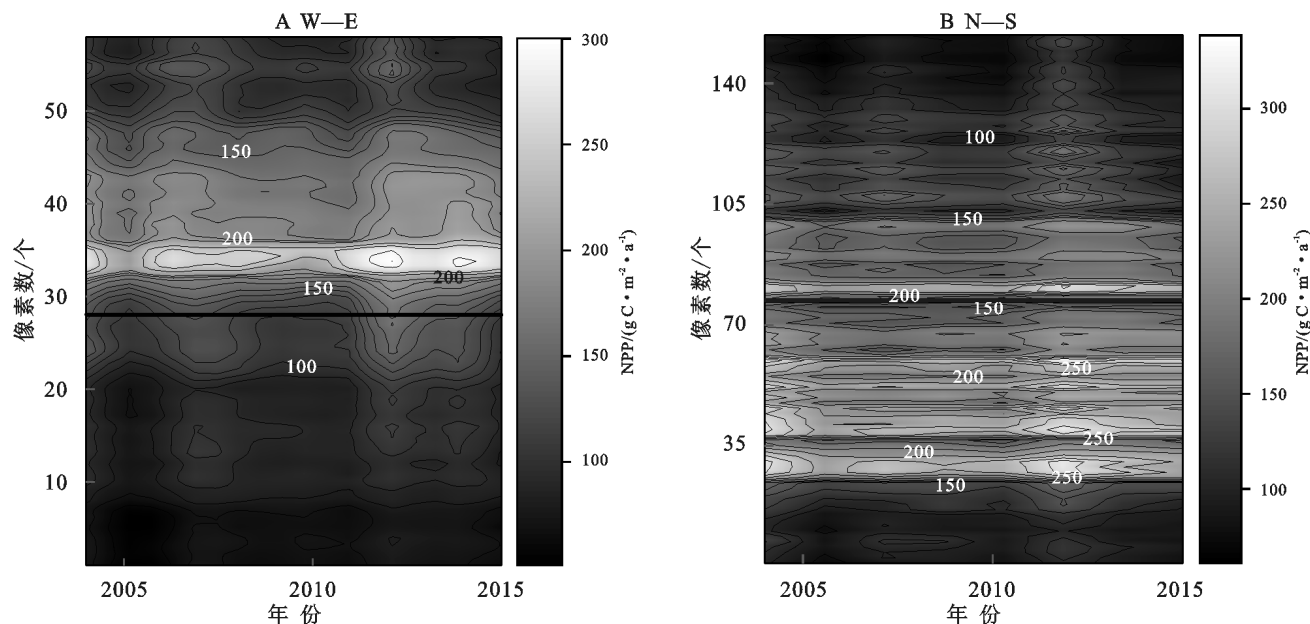


图 3 苏峪口国家森林公园 NPP 剖面晕渲图

在 W—E 剖面时序变化图中(图 3A), 苏峪口国家森林公园植被净初级生产力在水平地带性分布上东部要优于西部, 其中 W—E 剖面东部 NPP 总量为 0.014 5 Tg C, 占比 66.55%, 西部 NPP 总量为 0.007 3 Tg C, 占比 33.45%。由于地理分界的原因, 西部为大面积的荒漠和草原所占据, 东部浅山地带有部分草原和灌丛区。从时间序列的整体来看, 2004 年、2007 年、2012—2014 年(5 a)植被净初级生产力整体要优于 2005—2006, 2008—2011 年、2015 年(7 a), 这与总 NPP 变化的偏差分析结果一致。在植被 NPP 较好的 5 a 里, 荒漠面积明显减少, 草原和灌丛面积相应明显增加, 针叶林和阔叶林有小范围面积的增加。

在 N—S 剖面时序变化图中(图 3B), 苏峪口国家森林公园植被净初级生产力在水平地带性分布上北部优于南部, 其中 N—S 剖面北部 NPP 总量为 0.042 5 Tg C, 占比 57.35%, 南部 NPP 总量为 0.031 6 Tg C, 占比 42.65%。受地形及日照影响, 北半球植被 NPP 的高值部分主要分布在坡面北侧(阴坡)^[20], 因沿 N—S 剖面线存在多个山坡, 每座山坡的北侧植被

NPP 均高于南侧, 所以植被 NPP 的高值部分呈北高南低交替分布且 NPP 等值线北侧梯度大, 南侧梯度小。2004—2015 年 N—S 剖面线北部除 2004 年、2012 年因降水丰富使得灌丛面积增加近 20 个像素(约 10 km)外, 其余年份绝大部分均由荒漠和草原覆盖, 且面积趋于稳定; 2004—2015 年 N—S 剖面线南部由荒漠、草原和灌丛交错分布, 2004 年、2007 年、2012—2014 年针叶林边缘线向南部扩张了近 40 个像素(约 20 km), 其余年份几乎全部由荒漠、草原和灌丛覆盖; 2004—2015 年 N—S 剖面线中部由针叶林和阔叶林交叉分布, 且阔叶林林线在 2004 年和 2012 年所占范围居多。

3.3.2 贺兰山山脊线生态剖面垂直地带性变化 因研究区呈地质学上的 NNE—SSW 向狭长分布, 为全面表达研究区生态剖面上 NPP 变化细节, 沿贺兰山自然保护区地形山脊线建立生态剖面线, 为研究生态剖面上 NPP 变化细节与 DEM 之间的对应关系, 对研究区时间序列 2004—2015 年 NPP 剖面与 DEM 进行叠加分析(图 4)。

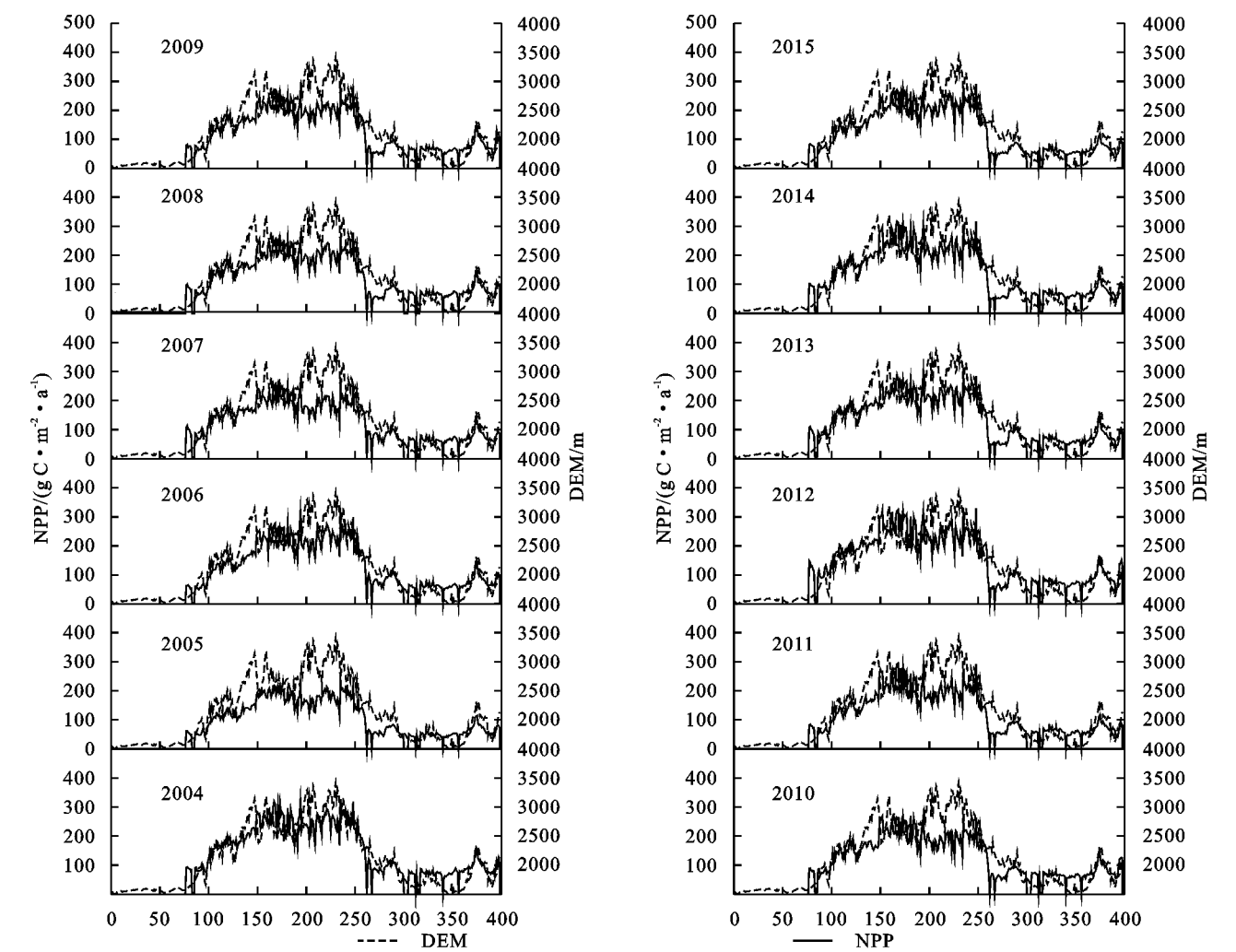


图 4 山脊线剖面与 DEM 叠加分析时序变化

由山脊线剖面与 DEM 叠加分析时序变化(图 4)可知,植被 NPP 垂直地带性分布趋势明显,整体呈针叶林—阔叶林—灌丛—草原—荒漠的结构变化。由图 4 的研究区生态剖面的 NPP 与 DEM 叠加分析可知,植被 NPP 变化情况与 DEM 关系密切,越接近山脊线中点(越在研究区中心),DEM 值越大,植被 NPP 值就越大。海拔在 1 500 m 左右几乎无植被覆盖,植被 NPP 值接近 0 值;海拔在 1 500~2 000 m 对应的植被 NPP 值的变化范围为 0~100 g C/(m²·a);海拔在 2 000~2 500 m 对应的 NPP 值的变化范围为 100~200 g C/(m²·a),且变化趋势高度一致;海拔在 2 500 m 时,植被 NPP 值基本维持在 300 g C/(m²·a)左右。当海拔高于 2 500 m 以后,植被 NPP 值开始呈下降趋势,植被 NPP 值在 200~300 g C/(m²·a)变化。

3.4 MODIS NPP 的气候响应

3.4.1 气候变化情况 2004—2015 年贺兰山区局地气候呈湿冷化(图 5)。年均气温呈波动下降趋势,年均温度虽存在波动性但变化较为平稳,变化区间在 1.5℃以内,最高值出现在 2013 年,为 8.0℃,最低值

出现在 2011 年,为 6.6℃,气温变率为 -0.01℃/a;年均降水量呈波动上升趋势,研究区年均降水量变化区间在 14 mm 以内,在 2012 年出现的最高年均降水量为 312.9 mm,在 2005 年出现的最低年均降水量为 176.4 mm,降水变率为 2.77 mm/a。

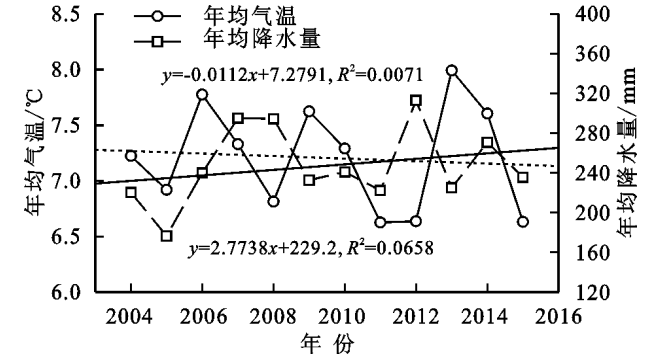


图 5 2014—2015 年研究区气候变化趋势

3.4.2 气候与 NPP 的响应分析 利用 SPSS® Pearson 相关性分析得到年均气温与总 NPP 间的相关性系数 $r=0.050\ 2$,置信度 $p=0.876$,则年均气温与总 NPP 不相关。通过图 6A 可直观看气温与 NPP 的

空间相关性, $[0.45, 0.95]$ 高度正相关区间主要集中在苏峪口国家森林公园附近区域, 面积约为 21.75 km^2 , 占研究区面积的 0.38% ; $[0.25, 0.45)$ 中度正相关区间主要零星分布在研究区中部, 面积约为 305.25 km^2 , 占研究区面积的 5.29% ; 93.13% 的区域 NPP

与气温的相关系数均在 $[-0.25, 0.25)$ 低度相关区间范围内; 剩余 0.12% 的区域 NPP 与气温的相关系数均在 $[-0.45, -0.95)$ 中度负相关区间范围内, 主要分布在于宁夏平原相交的边界区域。 $[-0.95, -0.45)$ 高度负相关区间所占面积为 0 。

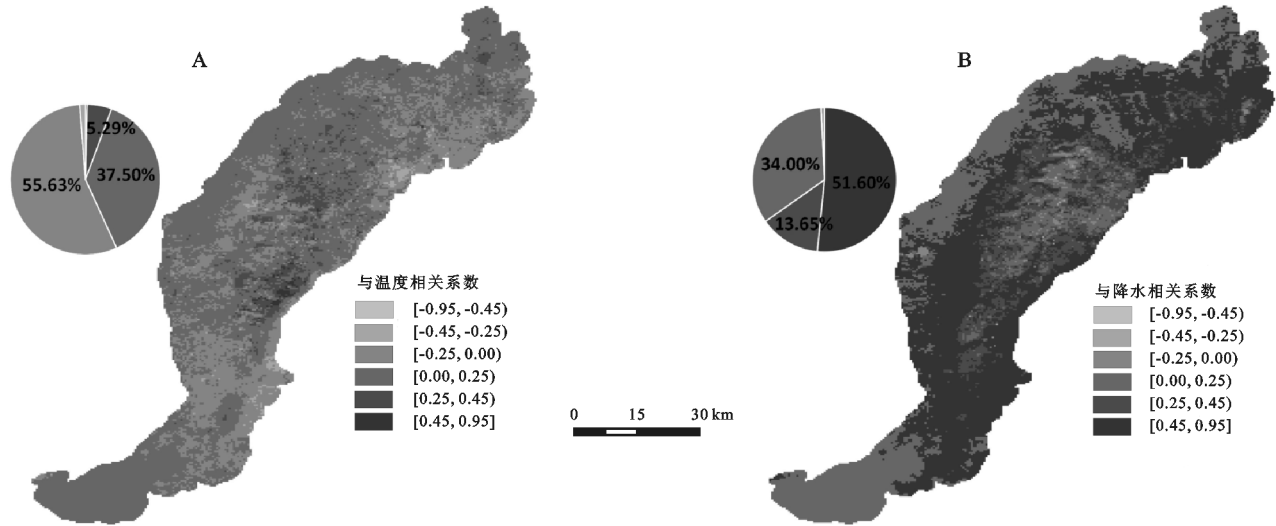


图 6 气候与 NPP 相关系数空间分布

利用 SPSS® Pearson 相关性分析得到两者之年均降水与 NPP 间的相关性系数 $r=0.6468$, 置信度 $p=0.023$, 则年均降水与 NPP 呈显著正相关。通过图 6B 可直观表示年降水与总 NPP 的空间相关性, $[0.45, 0.95]$ 高度正相关区间面积约为 2976.50 km^2 , 占研究区面积的 51.59% , 所占比例最大, 主要分布在草原和灌丛等对降水量响应较强的区域; $[0.25, 0.45)$ 中度正相关区间面积约为 787.25 km^2 , 占研究区面积的 13.64% , 主要分布在针叶林区域; $[0.00, 0.25)$ 低度正相关区间面积约为 1961.50 km^2 , 占研究区面积的 34.00% , 主要分布在海拔较高的阔叶林区域; $[-0.25, 0.00)$ 低度负相关区间面积约为 41.25 km^2 , 占研究区面积的 0.71% ; $[-0.45, -0.25)$ 中度负相关区间面积约为 3.46 km^2 , 占研究区面积的 0.06% ; $[-0.95, -0.45)$ 高度负相关区间面积约为 0 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

全球变化对陆地生态系统影响巨大, 预计将成为 21 世纪大量物种濒于灭绝的主要因素^[9]。近年来, 国际上对气候变化影响生态系统 NPP 方面开展了较多工作, 研究表明生态系统 NPP 的正遭受气候变化和人类活动的双重影响^[17-18]。

贺兰山作为国家级自然保护区, 滥砍盗伐得以有效禁止, 且地处高寒、远离城市, 几乎不受人类活动影响。因此, 气候变化是决定研究区植被生态系统的主

要因素, 直接或间接地影响着植被的净初级生产力。且中国宁夏贺兰山自然保护区位于季风气候向大陆性气候的过渡区, 对气候变化的响应极为敏感。研究表明, 研究区植被 NPP 在 12 a 内总体呈增加趋势, 植被 NPP 与降水的相关性大于与气温的相关性。由于 2004 年 9 月—2005 年 11 月在宁夏发生历史性旱灾^[21], 大部分区域降水仅达到 199.9 mm , 为历史上仅次于 1982 年 (192.4 mm) 的第二低值年, 年降水日数仅为 37 d, 导致 2005 年总 NPP 成为 2004—2015 年研究期最小值; 2006 年宁夏地区出现的罕见暴雨天气扭转了历史性干旱的局势^[22], 使得 2006 年总 NPP 未受到 2004—2005 年干旱年的影响, NPP 总量得以恢复; 2012 年宁夏贺兰气象站点监测到日降水量创 1951 年有气象记录以来的最高值^[23], 使得 2012 年 NPP 值显著增大。说明在干旱与半干旱地区, 降水变化是影响植被 NPP 的主导因素。这一结果与马安青^[24]、刘雪佳^[25]、焦伟^[26]等的研究结果一致。

研究还发现, 在海拔 3000 m 左右的区域, 植被 NPP 与气温呈中高度正相关 ($r \in [0.25, 0.45]$) 的同时, 对降水呈低度正相关 ($r \in [0.00, 0.25]$), 说明海拔改变了气候对研究区植被 NPP 的影响规律。但本文并未将高程、坡度、坡向等地形因素与气候因素结合起来研究其与植被 NPP 的响应关系, 这应是下一步的工作重点。

4.2 结论

(1) 时间变化规律。贺兰山 2004—2015 年平均 NPP 为 $97.91 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 总 NPP 变化范围为 $0.3244 \sim$

0.501 5 Tg C/a;NPP 增长速率为 0.281 6 g C/(m²·a)。贺兰山自然保护区是以山地针叶林和青海云杉为代表的荒漠区与半荒漠区典型森林生态系统,森林面积占比仅为 10%~20%,森林生态状况不容乐观。

(2) 空间分布规律。以苏峪口国家森林公园核心区中点做 W—E,N—S 剖面,得到长时序水平地带分布规律:东部植被净初级生产力要优于西部,北部植被净初级生产力要优于南部;将贺兰山沿山脊线生态剖面与 DEM 叠加分析得到垂直地带分布规律:植被 NPP 值整体呈现出针叶林—阔叶林—灌丛—草原—荒漠的垂直景观结构变化,NPP 高值集中分布在海拔 2 500 m 以上的高海拔地区,在海拔 1 500 m 左右几乎无植被覆盖。

(3) 气候响应规律。贺兰山区局地气候呈冷湿化趋势,气温变率为 -0.01℃/a,降水变率为 2.77 mm/a。相较于气温而言,降水量对研究区 NPP 的影响较大。植被 NPP 与气温不相关($r=0.050\ 2$, $p=0.876$);植被 NPP 与呈降水量显著正相关($r=0.646\ 8$, $p=0.023$),且高度正相关区域主要分布在草原和灌丛区。

参考文献:

- [1] UN Summit on Sustainable Development. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development[R].New York, USA: United Nations, 2015.
- [2] 王秋蓉,杜娟.立即行动共同寻求良策:首届可持续发展论坛聚焦落实 2030 年可持续发展议程[J].可持续发展经济导刊,2019,18(11):7-9.
- [3] Yang J, Zhang X C, Luo Z H, et al. Nonlinear variations of net primary productivity and its relationship with climate and vegetation phenology, China[J]. Forests, 2017,8(10).DOI:10.3390/f8100361.
- [4] Choudhury B J. Carbon use efficiency, and net primary productivity of terrestrial vegetation[J]. Advances in Space Research, 2000,26(7):1105-1108.
- [5] 赵志平,吴晓蕾,李果,等.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[J].生态学报,2015,35(2):350-360.
- [6] 祝萍,黄麟,肖桐,等.中国典型自然保护区生境状况时空变化特征[J].地理学报,2018,73(1):92-103.
- [7] 张懿铨,胡忠俊,祁威,等.基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析[J].地理学报,2015,70(7):1027-1040.
- [8] 王培娟,谢东辉,张佳华,等.长白山森林植被 NPP 主要影响因素的敏感性分析[J].地理研究,2008,27(2):323-331.
- [9] Jiang X D, Shen W, Bai X Y. Response of net primary productivity to vegetation restoration in Chinese Loess Plateau during 1986—2015[J]. Plos One, 2019,14(7). DOI:10.1371/journal.pone.0219270.
- [10] 周梦云,蔡永立,张端峰,等.宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化研究[J].生态科学,2019,38(5):78-85.
- [11] 刘胜涛,牛香,王兵,等.宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能[J].生态学杂志,2019,38(2):420-426.
- [12] 顾延生,丁俊傑,葛继稳.贺兰山中段植被类型及其覆盖变化研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2016,50(4):579-587.
- [13] Pang Y, Zhang B P, Zhao F, et al. Omni-directional distribution patterns of montane coniferous forest in the Helan Mountains of China[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(5):724-733.
- [14] 潘竞虎,李真.2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J].生态学杂志,2015,34(12):3333-3340.
- [15] 刘琳,李月臣,朱翠霞,等.2001—2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系[J].遥感信息,2013,28(5):99-108.
- [16] 崔林丽,杜华强,史军,等.中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J].地理科学,2016,36(5):787-793.
- [17] 田智慧,张丹丹,赫晓慧,等.2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J].水土保持研究,2019,26(2):255-262.
- [18] 李肖,袁金国,孟丹.河北省 2005—2014 年植被 NPP 时空演变及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2018,25(6):109-114,120.
- [19] 李登科,王钊.基于 MOD17 A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- [20] 张仕豪,熊康宁,张俞,等.石漠化封山育林区不同坡向群落空间结构与环境因子的关系[J].四川农业大学学报,2019,37(5):676-684,694.
- [21] 王欢,魏蒙,王玉国,等.宁夏同心县 1955—2015 年降水量的变化特征分析[J].南方农业,2019,13(11):151-152,155.
- [22] 肖云清,胡文东,郑玲,等.宁夏 2 次暴雨过程初步诊断分析[J].农业科学研究,2007,28(3):30-33.
- [23] 宁贵财,尚可政,王式功,等.贺兰山对银川一次致灾暴雨过程影响的数值模拟[J].中国沙漠,2015,35(2):464-473.
- [24] 马安青,高峰,贾永刚,等.基于遥感的贺兰山两侧沙漠边缘带植被覆盖演变及对气候响应[J].干旱区地理,2006,29(2):170-177.
- [25] 刘雪佳,董璐,赵杰,等.我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系[J].干旱区研究,2019,36(2):459-466.
- [26] 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.