

DOI: 10.5846/stxb201910092097

王举凤,何亮,陆绍娟,吕渡,黄涛,曹琦,张晓萍,刘宝元.内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应.生态学报,2020,40(16):5620-5629.

Wang J F, He L, Lu S J, Lü D, Huang T, Cao Q, Zhang X P, Liu B Y. Photosynthetic vegetation cover response to precipitation on the Inner Mongolian Steppe. Acta Ecologica Sinica 2020, 40(16): 5620-5629.

# 内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应

王举凤,何亮,陆绍娟,吕渡,黄涛,曹琦,张晓萍,刘宝元\*

西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

**摘要:** 植被是影响土壤侵蚀过程的重要因素。论文基于 MODIS 遥感数据和同期降水数据,用相关和回归分析方法从不同时间尺度揭示了内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原 2002—2016 年光合植被覆盖度(Fractional Photosynthetic Vegetation  $f_{pv}$ )的变化规律及其对降水变化的响应。结果表明:(1) 2002—2016 年间多年平均  $f_{pv}$  草甸草原为 46.5%,典型草原和荒漠草原分别为 36.3%和 22.4%;草甸草原  $f_{pv}$  随时间变化呈不显著增长趋势(线性变化斜率为 0.29%/a),典型草原和荒漠草原  $f_{pv}$  呈不显著下降趋势(线性变化斜率分别为 -0.04%/a 和 -0.21%/a);相应时期年降水量随时间变化都呈现不显著波动上升趋势。(2) 内蒙古草原的月植被覆盖度对月降水量存在明显的 1—2 个月滞后效应和显著的累积效应,且表现出草原类型越干旱,滞后效应越明显的特征;相比草甸草原和典型草原,荒漠草原植被对降水量变化更加敏感。(3) 内蒙古 3 类草原年平均植被覆盖度对降水量的响应,均表现出年、季、月尺度上分别受当年降水量、生长季降水量以及 6、7、8 月份降水量的显著影响的特征;3 类草原年植被覆盖度与生长季降水线性拟合结果都较好,内蒙古 3 种草原类型的年植被覆盖度与降水量具有的强相关性,可为区域土壤侵蚀动态评价提供科学依据。

**关键词:** 草甸草原;典型草原;荒漠草原;光合植被覆盖度;降水量

## Photosynthetic vegetation cover response to precipitation on the Inner Mongolian Steppe

WANG Jufeng, HE Liang, LU Shaojuan, LÜ Du, HUANG Tao, CAO Qi, ZHANG Xiaoping, LIU Baoyuan\*

Northwest Agriculture and Forestry University, Institute of Soil and Water Conservation State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China

**Abstract:** Vegetation cover is an important factor in the process of soil erosion. This paper revealed the changes of photosynthetic vegetation coverage ( $f_{pv}$ ) for meadow steppe, typical steppe and desert steppe in Inner Mongolia from 2002 to 2016 and their responses to precipitation in the annual, seasonal, and monthly scales. The MODIS derived data and corresponding precipitation data were used in the analysis. The results showed that: (1) from 2002 to 2016, the annual average  $f_{pv}$  of three steppe types was 46.5%, 36.3%, and 22.4%, respectively. The trend of  $f_{pv}$  over time for all three steppe types was not significant. For meadow steppe the annual change was positive with a rate of 0.29% per year, while for typical steppe and desert steppe it was negative with the rate of -0.04% / a and -0.21% / a, respectively. The annual precipitation for the three steppe types all showed an increasing trend without statistical significance. (2) The monthly vegetation coverage was clearly affected by the prior one to two month precipitation, and the cumulative effect was also evident. The more arid the steppe type, the more obvious of the lag effect. The coverage of dessert steppe was comparatively more sensitive to the change of precipitation. (3) The annual vegetation coverage of three steppe types in Inner Mongolia was significantly affected by the annual precipitation, growth season precipitation, and the precipitation in June, July, and

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040202)

收稿日期:2019-10-09; 网络出版日期:2020-06-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Baoyuan@bnu.edu.cn

August. The linear regression between the annual vegetation coverage and the precipitation in the growth season showed a good fit. The significant correlation between annual vegetation coverage and precipitation of three steppe types in Inner Mongolia provides a scientific basis for dynamic , regional soil erosion assessment.

**Key Words:** meadow steppe; typical steppe; desert steppe; photosynthetic vegetation coverage; precipitation

草地是陆地生态系统的重要组成部分,在调节气候、保持水土、改良土壤和维持生物多样性等方面发挥着重要作用。植被覆盖度及其变化深刻影响着生态系统的植被生产能力、土壤理化性质、产汇流过程和生态系统功能,从而影响着土壤流失等地表物质的传输和平衡,是土壤侵蚀评价中的重要影响因素<sup>[1]</sup>。内蒙古地区位于中国北方,气候主要为干旱、半干旱和半湿润区,是我国北方草地的主体部分和重要的农牧业生产基地,生态环境脆弱,土地退化严重<sup>[2]</sup>。研究内蒙古不同类型草地植被在年、季、月等尺度上对降水的响应和敏感程度,有助于揭示草地覆盖变化影响因素,提高区域土壤侵蚀动态评价效率。

很多研究结果认为,近年来内蒙古植被覆盖度总体呈上升趋势<sup>[3]</sup>,但不同地区植被覆盖度变化趋势表现不同。如彭飞等<sup>[4]</sup>、李林叶等<sup>[5]</sup>发现 2000 年后的 15 年中呼伦贝尔草原植被覆盖度整体下降;焦全军等<sup>[6]</sup>、张圣微等<sup>[7]</sup>认为,锡林郭勒草原植被覆盖 2001—2014 年总体呈增加趋势,不同年份各类型草原植被覆盖度表现为由东向西递减的规律;而希拉穆仁草原近年来则处于中度退化状态<sup>[8]</sup>。在植被覆盖度对降水的响应方面,大量研究结果认为,降水是影响植被变化最主要的自然因素,是制约中国北方温带草原植被生长的根本原因。孙艳玲等<sup>[9]</sup>、张清雨等<sup>[10]</sup>认为,1982—2000 年内蒙古地区植被 NDVI 与降水有很好的相关性,植被受降水的影响较大。许旭等<sup>[11]</sup>、穆少杰等<sup>[3]</sup>认为,2001—2010 年内蒙古草原生态区植被覆盖度在年际水平上主要受降雨影响,月植被覆盖度对降雨量的响应存在时滞效应。上述研究均从植被生态角度,探讨了植被覆盖度的变化及降水对植被生长的一般影响,而对不同类型草原植被覆盖度的多年变化状态,对降水量变化的敏感程度和定量关系,植被覆盖度对不同时段降水量的响应过程和密切程度,最佳模拟式等等问题还有待研究。

植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是植被的叶、茎、枝的垂直投影面积占地面总面积的比例,是衡量地表植被状况的重要指标<sup>[12]</sup>。地表植被按照功能属性可以分为绿色光合植被(Photosynthetic Vegetation, PV)和非光合植被(Non-photosynthetic Vegetation, NPV)。在以往像元二分模型基础上,Guerschman 等<sup>[13]</sup>在 2009 年提出了像元三分模型,将光合植被(PV)、非光合植被(NPV)和裸土(BS)作为混合像元的 3 种组分进行线性分离,经过澳大利亚稀树草原区域的验证、评估和改进,推出了基于 MODIS 数据(MCD43A4, MOD09A1)的全球产品<sup>[13]</sup>。在我国北方草原地区的应用<sup>[14-16]</sup>表明,像元三分模型中的 PV 覆盖度精度可以达到 91.2%,而 NPV、BS 的反演还存在很大不确定性。

本文将使用该数据集的光合植被(PV)数据部分,深入分析内蒙古不同类型草原年、月植被覆盖度变化,及其对不同时间尺度降水量的响应过程和特征,为区域土壤侵蚀动态评价和生态环境保护提供理论依据。

## 1 研究区和样地选择

内蒙古自治区位于我国的北部边疆,由东北向西南斜伸,总面积 118.3 万 km<sup>2</sup>。其地貌以蒙古高原为主体,主要包括由呼伦贝尔、锡林郭勒、巴彦淖尔—阿拉善及鄂尔多斯等高平原,平均海拔 1000 m 左右。以温带大陆性季风气候为主,平均降水量 50—450 mm,平均气温 -3.7—11.2 °C。地带性土壤的分布从东部的黑土,向西依次为暗棕壤、黑钙土、栗钙土、棕壤土、黑垆土、灰钙土、风沙土和灰棕漠土。按照降雨量和温度的梯度变化,植被类型沿东北西南一线依次为森林、草原和荒漠<sup>[17]</sup>。随气候条件的地带性差异形成了草原植被的 3 个亚类型,即草甸草原、典型草原和荒漠草原。

本文结合中国植被图和 Google Earth 以内蒙古 3 种草原类型,即呼伦贝尔市鄂温克族自治旗的草甸草原区、锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗的典型草原区、包头市达尔罕茂明安联合旗的荒漠草原区为研究对象,各草原类型区分别选取 3 个代表性研究样地,每个样地均包括 9 个像元,即每个草原区的样地面积均为 6.75 km<sup>2</sup>,取像

元均值作为该类型草原的月、年植被覆盖度值。草原类型的分区由《中华人民共和国植被图 1:100 万》<sup>[18]</sup> 提供。研究区和样地位置如图 1 所示,基本情况特征和降水组合方式如表 1。

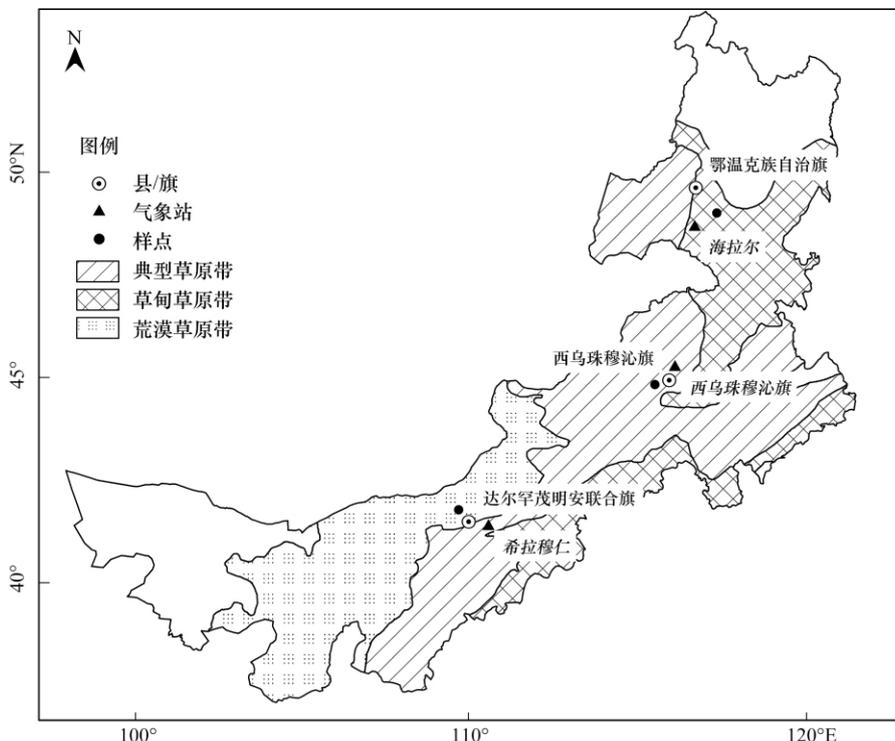


图 1 研究区位置及气象站点分布图

Fig.1 Location of the study area and meteorological stations

表 1 研究样地位置与基本情况特征

Table 1 The location of research sites and basic characteristics

项 Item	草甸草原 Meadow steppe	典型草原 Typical steppe	荒漠草原 Desert steppe
样地位置 Location	呼伦贝尔市鄂温克族自治旗(鄂温克旗)	锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗(西乌珠穆沁旗)	包头市达尔罕茂明安联合旗(达茂旗)
多年平均降水量 Average annual precipitation /mm	333	295	291
海拔高度 Altitude /m	762	1025	1610
平均坡度 Average slope degree/°	0.5	1.5	0.5
经纬度 Latitude and longitude	48°35'27"N , 119°15'31" E	44°47'27"N , 117°19'59" E	41°21'18"N , 111°12'58" E
土壤 Soil	暗棕壤、黑土、暗色草甸土等	栗钙土、栗褐土等	棕钙土、栗钙土等
主要物种 Major species	贝加尔针茅 ( <i>Stipa Baicalensis</i> Roshev)、羊草 ( <i>Leymus chinensis</i> )、线叶菊 ( <i>Filifolium sibiricum</i> ) 等	大针茅 ( <i>Stipa grandis</i> )、羊草、糙隐子草 ( <i>Cleistogenes squarrosa</i> ) 等	羊草、冰草 ( <i>Agropyron cristatum</i> )、糙隐子草等
气象站 Weather station	海拉尔	西乌珠穆沁旗	希拉穆仁

2 数据来源和方法

2.1 数据来源

采用 MODIS 产品( MCD43A4 ,MOD09A1 ,2002—2016 年) ,使用线性分离方法将每个像元分为 PV、NPV

和 BS 3 种组分<sup>[13]</sup>, 得到空间分辨率为 500 m 的月植被覆盖产品数据集<sup>[13]</sup>。分析该数据集中的 PV 覆盖度 ( $f_{PV}$ ) 部分并对数据进行了质量检查。采用 6—9 月生长季  $f_{PV}$  值的平均值来表征内蒙古不同类型草原年植被覆盖度。

同期降水数据来源于中国气象数据共享服务网 (<http://data.cam.gov.cn>)。分别选取距离研究样点最近的 3 个气象站, 即海拉尔、西乌珠穆沁旗、希拉穆仁的日降水数据, 年降水量是指 1—12 月的月降水量之和。

## 2.2 分析方法

### (1) 变化趋势

为研究植被覆盖度和降水量的变化趋势, 对数据和年份之间进行线性回归, 计算其拟合斜率  $b$  和相关系数  $r$ <sup>[19]</sup>。如果斜率大于零, 说明要素变化趋于上升趋势, 反之则说明要素变化趋于下降。如果  $r$  值通过 0.05 的显著性水平 ( $P < 0.05$ ), 则认为要素呈显著增加或显著下降趋势。

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \sum_{i=1}^n x_i / n \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2 / n} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} \quad (2)$$

式中  $b$  为斜率;  $x_i$  为第  $i$  年的降水量 (植被覆盖度);  $t_i$  为第  $i$  年份, 在 2002—2016 间取值;  $n$  为研究时间段, 取 15。

### (2) 相关性分析

植被覆盖度与降水量之间相关系数的计算公式如下:

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

式中,  $R_{xy}$  为两个变量的相关系数,  $x_i$  为第  $i$  年/月的植被覆盖度,  $y_i$  为第  $i$  年/月的降水量,  $\bar{x}$  为多年/月植被覆盖度的平均值,  $\bar{y}$  为多年/月降水的平均值,  $n$  为样本数。并建立内蒙古草原  $f_{PV}$  与降水的回归模型, 利用  $F$  检验对回归模型精度进行验证。

## 3 结果分析

### 3.1 光合植被覆盖度 $f_{PV}$ 和降水量的年际变化特征

内蒙古草原生长季 2002—2016 年多年平均植被覆盖度, 以草甸草原样地最高, 为 46.5%, 其次为典型草原, 为 36.3%, 最低为荒漠草原 22.4%。对 3 个草原区  $f_{PV}$  时间序列进行分析发现, 草甸草原  $f_{PV}$  随年际变化呈不显著增长趋势, 年变化斜率为 0.29%/a, 而典型草原和荒漠草原  $f_{PV}$  呈不显著下降趋势, 年变化斜率分别为 -0.04%/a 和 -0.21%/a, 如图 2 所示。

2002—2016 年 3 个草原区多年平均降水量分别为 341.0、299.7、295.4 mm, 降水量随年际变化都呈现不显著波动上升趋势。其中海拉尔的年降水量增长速率最大, 年变化斜率为 8.5 mm/a, 希拉穆仁的降水量上升趋势最弱, 年变化斜率为 2.0 mm/a, 西乌珠穆沁旗的年降水量变化居中, 为 6.1 mm/a。

### 3.2 光合植被覆盖度 $f_{PV}$ 和降水量的年内变化特征

图 3 是各草原区样地月均植被覆盖度变化曲线 (源数据缺少 11、12 月和 1 月数据)。受季风气候影响, 各草原区月均植被覆盖度均表现出 2—3 月份最低, 3—7 月持续上升, 7 月均达到植被覆盖度峰值, 分别为 61.4%、50.2%、25.0%。草甸草原和典型草原植被覆盖度在 7—10 月呈现快速下降过程, 而荒漠草原 7—9 月植被覆盖度缓慢降低, 10 月份植被均处于荒芜状态,  $f_{PV}$  值小于 10%。

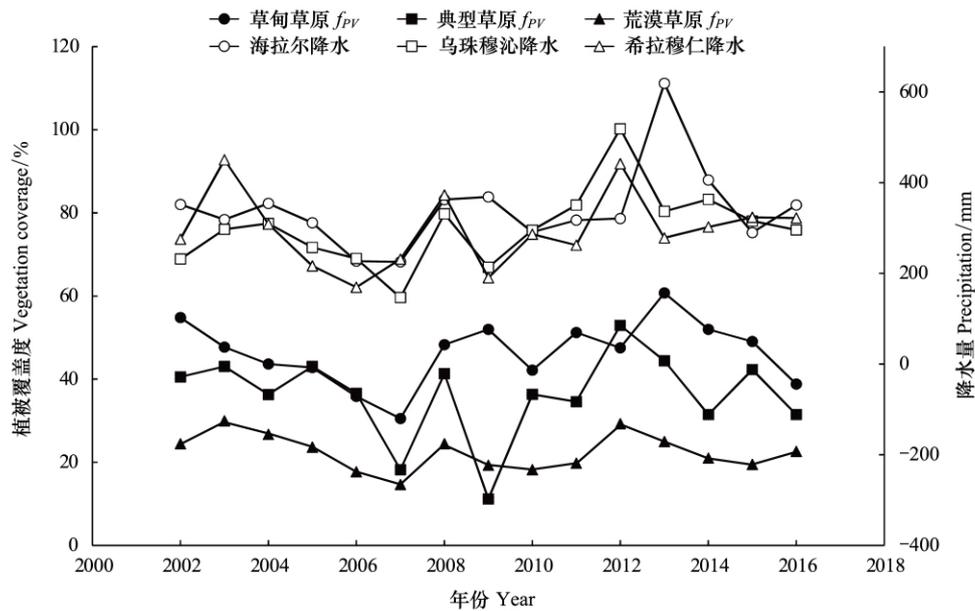


图2 三类草原区 2002—2016 年  $f_{PV}$  和年降水量的变化

Fig.2 Annual  $f_{PV}$  and precipitation in the research sites of three steppes from 2002 to 2016

从 3 类草原区的多年月平均降水曲线(图 4) 明显看出,降水量最大的月份均为 7 月份,草甸草原区的海拉尔站 7 月降水量(96.4 mm) 明显大于典型草原区的西乌珠穆沁旗站降水量(70.7 mm) 和荒漠草原区的希拉穆仁站降水量(66.8 mm)。3 类草原的夏季(6、7、8 月) 降水占全年的比例分别为 63.5%、61.7%、60.0% 左右。3 类草原区月均降水量的分布格局与月植被覆盖度的分布十分相似。

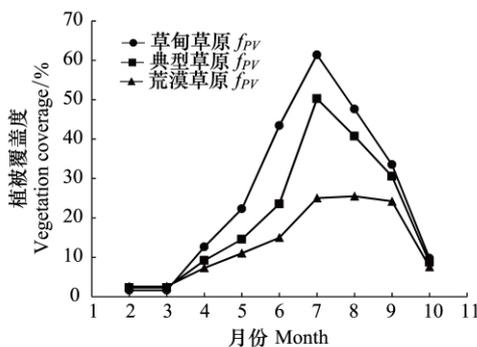


图3 2002—2016 年月均  $f_{PV}$

Fig.3 Mean monthly  $f_{PV}$  from 2002 to 2016

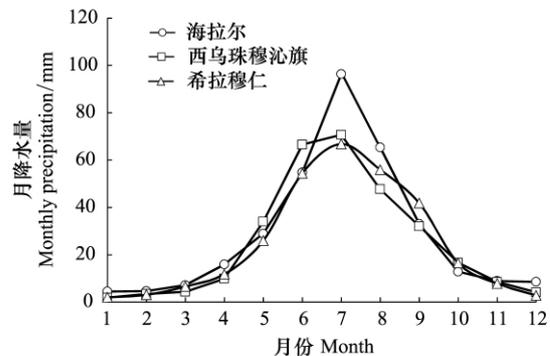


图4 2002—2016 年月均降水量变化

Fig.4 Mean monthly precipitation from 2002 to 2016

### 3.3 月植被覆盖度 $f_{PV}$ 对降水的响应

对 3 类草原区月植被覆盖度值与月降水量进行相关性分析,计算生长季逐月  $f_{PV}$  与当月和前几月降水的相关系数,探讨月降水量对月植被生长影响的滞后效应,前期累积降水量对月植被生长的影响程度,如表 2、表 3 所示。

从月植被覆盖度与逐月降水的相关系数(表 2) 可知,内蒙古 3 种类型草原在 6—9 月的当月植被覆盖度与前一个月、当月降水量关系最为密切;5 月植被覆盖度受降水的影响,仅在荒漠草原与 5 月降水达到显著相关,在草甸草原和典型草原不显著。表 2 还可以看出,3 类草原月植被覆盖度对月降水量的响应均存在滞后

效应, 尤其 1—2 个月的滞后效应最明显, 且表现出越干旱的草原类型滞后效应越明显的特征。

表 2 月植被覆盖度  $f_{PV}$  与逐月降水的 Pearson 相关 ( $R$ )

Table 2 Coefficient of correlation between monthly vegetation coverage  $f_{PV}$  and monthly precipitation ( $R$ )

草原类型 Steppe type	降水 Precipitation	植被覆盖度 Vegetation coverage					
		5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
草甸草原 Meadow steppe	当月	0.049	0.146	0.627*	-0.004	0.224	0.418
	前第 1 月	0.118	0.589*	0.445	0.692**	0.314	0.810**
	前第 2 月	0.204	0.131	-0.049	0.409	0.484	-0.240
	前第 3 月	-0.210	-0.279	0.035	-0.156	0.160	-0.168
	前第 4 月	-0.320	-0.113	-0.448	0.004	-0.260	0.075
典型草原 Typical steppe	当月	0.028	0.430	0.406	0.074	0.475	0.197
	前第 1 月	-0.312	0.498	0.438	0.396	0.246	0.466
	前第 2 月	0.559*	0.127	-0.020	0.417	0.304	0.132
	前第 3 月	-0.233	0.414	-0.169	-0.149	0.326	-0.060
	前第 4 月	-0.118	-0.152	0.153	-0.290	-0.304	0.308
荒漠草原 Desert steppe	当月	0.607*	0.142	0.719**	0.755**	0.078	0.154
	前第 1 月	0.090	0.796**	0.289	0.694**	0.791**	0.104
	前第 2 月	-0.295	0.497	0.507	0.281	0.637*	0.352
	前第 3 月	0.104	-0.362	0.473	0.442	0.276	0.604*
	前第 4 月	0.290	0.167	0.004	0.255	0.369	0.558*

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 3 月植被覆盖度  $f_{PV}$  与累积降水的 Pearson 相关 ( $R$ )

Table 3 Coefficient of correlation between monthly vegetation coverage  $f_{PV}$  and accumulated precipitation ( $R$ )

草原类型 Steppe type	降水 Precipitation	植被覆盖度 Vegetation coverage					
		5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
草甸草原 Meadow steppe	当月	0.049	0.146	0.627*	-0.004	0.224	0.418
	当月+前 1 个月	0.100	0.517*	0.716**	0.652**	0.366	0.851**
	当月+前 2 个月	0.134	0.528*	0.675**	0.775**	0.664**	0.359
	当月+前 3 个月	0.105	0.50	0.672**	0.686**	0.513	0.073
	当月+前 4 个月	0.051	0.49	0.657**	0.674**	0.559*	0.097
典型草原 Typical steppe	当月	0.028	0.430	0.406	0.074	0.475	0.197
	当月+前 1 个月	-0.056	0.675**	0.585*	0.454	0.425	0.451
	当月+前 2 个月	0.042	0.703**	0.594*	0.583*	0.552*	0.391
	当月+前 3 个月	0.015	0.710**	0.586*	0.528*	0.591*	0.205
	当月+前 4 个月	0.009	0.721**	0.583*	0.507	0.494	0.315
荒漠草原 Desert steppe	当月	0.607*	0.142	0.719**	0.755**	0.078	0.154
	当月+前 1 个月	0.444	0.611*	0.606*	0.943**	0.699**	0.151
	当月+前 2 个月	0.328	0.675**	0.712**	0.864**	0.866**	0.405
	当月+前 3 个月	0.348	0.580*	0.751**	0.892**	0.756**	0.631*
	当月+前 4 个月	0.369	0.592*	0.741**	0.876**	0.791**	0.683**

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从月植被覆盖度  $f_{PV}$  与前期累积降水量的相关系数(表 3)看出, 内蒙古草原月累积降水对植被的作用在各月间以及不同类型草原区差异较大。5 月植被覆盖度受累积降水的影响在各类型草原均不显著, 整体以 6 至 10 月的植被覆盖度与月累积降水相关性较好, 表现为越干旱的地区越受更长时间的前期降水影响的特征。总体上, 草甸草原植被覆盖度与当月+前 1 个月、当月+前 2 个月降水量最密切, 典型草原植被覆盖度与当月+

前 2 个月、当月+前 3 个月降水量最密切,荒漠草原植被覆盖度与当月+前 3 个月、当月+前 4 个月降水量最密切。

从草原类型来看,草甸草原和典型草原植被覆盖度与累积降水相关性高的月份主要是 6、7、8 月;荒漠草原在 6 至 10 月植被覆盖度与累积降水相关性整体都较好,同时,荒漠草原植被覆盖度与累积降水的相关性较草甸草原和典型草原显著,因为荒漠草原区降水量低,植被对降水更加敏感。

总的来看,5 月的植被覆盖度和降水量,除了典型草原与前第 2 个月的降水量、荒漠草原植被覆盖度与当月降水量为显著相关外,其余均无显著相关,受累积降水量的影响在各类型草原也均不显著。说明研究区 5 月份植被覆盖度开始增加,与当月降水量、前期各月降水量、累积降水量关系不明显,但有草原类型越干旱,受前期降水量、累积降水量影响越大的趋势;内蒙古草原 6—9 月生长季植被对降水的响应较为强烈。

### 3.4 年植被覆盖度 $f_{PV}$ 对降水的响应

用生长季 6—9 月植被覆盖度均值( $f_{PV}$ )代表年植被覆盖度,探讨年植被覆盖度与生长季各月、不同月累积降水量间的响应密切程度,以及回归关系(表 4);年植被覆盖度与当年、年不同时段降水量间的响应密切程度,及其回归关系,如当年降水量、生长季(6—9 月)降水量、前期(11—5 月)降水量,结果如表 5。

表 4 年植被覆盖度与生长季各月降水量间的一元和多元回归

Table 4 Single Factor and Multiple Regression Between Annual Vegetation Coverage and Monthly Precipitation in Growth Season

草原类型 Steppe type	降水量 Precipitation	Pearson 系数 Pearson coefficient	回归方程 Regression equation	方程显著性 Significance	决定系数( $R^2$ ) Decisive coefficient
草甸草原 Meadow steppe	6 月	0.441	$Y = 0.089X + 41.631$	0.100	0.194
	7 月	0.753**	$Y = 0.087X + 38.129$	0.001**	0.566
	8 月	0.041	$Y = 0.009X + 45.878$	0.885	0.002
	9 月	-0.007	$Y = -0.002X + 46.549$	0.980	0.000
	6—7 月总雨量	0.817**	$Y = 0.076X + 34.941$	0.000**	0.667
	6—8 月总雨量	0.860**	$Y = 0.083X + 28.520$	0.000**	0.739
	6—9 月总雨量	0.816**	$Y = 0.075X + 27.805$	0.000**	0.665
	6、7 月	—	$Y = 0.066X_1 + 0.080X_2 + 35.129$	0.001**	0.670
	6、7、8 月	—	$Y = 0.087X_1 + 0.083X_2 + 0.067X_3 + 29.341$	0.000**	0.746
	6、7、8、9 月	—	$Y = 0.087X_1 + 0.083X_2 + 0.067X_3 - 0.002X_4 + 29.385$	0.005*	0.746
	典型草原 Typical steppe	6 月	0.053	$Y = 0.130X + 27.649$	0.056
7 月		0.363	$Y = 0.070X + 31.350$	0.183	0.132
8 月		0.102	$Y = 0.050X + 33.904$	0.718	0.010
9 月		0.233	$Y = 0.117X + 32.524$	0.404	0.054
6—7 月总雨量		0.588*	$Y = 0.090X + 23.947$	0.021*	0.346
6—8 月总雨量		0.617*	$Y = 0.094X + 18.952$	0.014*	0.380
6—9 月总雨量		0.621*	$Y = 0.085X + 17.745$	0.013*	0.386
6、7 月		—	$Y = 0.128X_1 + 0.068X_2 + 22.906$	0.057	0.380
6、7、8 月		—	$Y = 0.120X_1 + 0.077X_2 + 0.065X_3 + 19.726$	0.124	0.395
6、7、8、9 月		—	$Y = 0.117X_1 + 0.075X_2 + 0.039X_3 + 0.062X_4 + 19.379$	0.223	0.407
荒漠草原 Desert steppe		6 月	0.306	$Y = 0.052X + 19.594$	0.267
	7 月	0.759**	$Y = 0.105X + 15.447$	0.001**	0.576
	8 月	0.597*	$Y = 0.101X + 16.802$	0.019*	0.357
	9 月	0.108	$Y = 0.022X + 21.495$	0.702	0.012
	6—7 月总雨量	0.640*	$Y = 0.056X + 15.624$	0.010**	0.410
	6—8 月总雨量	0.840**	$Y = 0.065X + 10.923$	0.000**	0.705
	6—9 月总雨量	0.760**	$Y = 0.051X + 11.323$	0.001**	0.577
	6、7 月	—	$Y = -0.017X_1 + 0.111X_2 + 15.912$	0.005**	0.583
	6、7、8 月	—	$Y = 0.012X_1 + 0.088X_2 + 0.085X_3 + 11.085$	0.000**	0.811
	6、7、8、9 月	—	$Y = -0.001X_1 + 0.093X_2 + 0.084X_3 + 0.022X_4 + 10.697$	0.001**	0.818

注: \*、\*\* 分别是在 0.05、0.01 水平(双侧)上显著相关; “—”表示不作相关。

从年植被覆盖度(6—9月植被覆盖度均值  $f_{pv}$ )与生长季各月(6—9月)降水量间的响应程度来看(表4),单月降水因子对草甸草原和典型草原植被覆盖度主要是与7月降水量相关性最好,7、8月降水对荒漠草原植被影响最大,其相关系数为显著程度。将生长季降水量进行逐月累积后发现,3类草原年植被覆盖度与生长季各月组合降水的相关系数都达到显著甚至极显著,总体上与6—8月总降水量最相关。从年植被覆盖度与生长季各月降水量间的多元关系来看,随着月份的增加,3类草原年植被覆盖度与各月的关系也越密切,与6、7、8、9月的多元关系最优,其方程决定系数分别为0.746、0.407、0.818。说明3类草原年植被覆盖度与整个生长季降水都相关,尤其是6—8月的总降水量的影响最显著。

表5 年植被覆盖度与年降水量间的一元和多元回归

Table 5 Single factor and multiple regression between annual vegetation coverage and annual precipitation

草原类型 Steppe type	降水量 Precipitation	Pearson 系数 Pearson coefficient	回归方程 Regression equation	显著性 Significance	决定系数( $R^2$ ) Decisive coefficient
草甸草原 Meadow steppe	当年	0.766**	$Y=0.065X+24.434$	0.001**	0.585
	生长季(6—9月)	0.816**	$Y=0.075X+27.805$	0.000**	0.665
	前期(11—5月)	-0.015	$Y=-0.004X+46.808$	0.958	0.000
	当年、前期	—	$Y=0.076X_1-0.099X_2+28.358$	0.001**	0.694
	生长季、前期	—	$Y=0.076X_1-0.031X_2+29.942$	0.001**	0.678
	当年、前一年	—	$Y=0.063X_1+0.011X_2+21.492$	0.004**	0.604
典型草原 Typical steppe	当年	0.662**	$Y=0.082X+11.730$	0.007**	0.439
	生长季(6—9月)	0.621*	$Y=0.085X+17.745$	0.013*	0.386
	前期(11—5月)	0.141	$Y=0.052X+32.895$	0.616	0.020
	当年、前期	—	$Y=0.087X_1-0.044X_2+12.967$	0.027*	0.451
	生长季、前期	—	$Y=0.087X_1+0.064X_2+13.315$	0.040*	0.416
	当年、前一年	—	$Y=0.085X_1-0.009X_2+13.592$	0.030*	0.444
荒漠草原 Desert steppe	当年	0.739**	$Y=0.040X+10.691$	0.002**	0.546
	生长季(6—9月)	0.760**	$Y=0.051X+11.323$	0.001**	0.577
	前期(11—5月)	0.643**	$Y=0.114X+15.625$	0.010**	0.413
	当年、前期	—	$Y=0.030X_1+0.059X_2+10.179$	0.003**	0.619
	生长季、前期	—	$Y=0.040X_1+0.074X_2+9.217$	0.000**	0.725
	当年、前一年	—	$Y=0.040X_1+0.021X_2+4.468$	0.001**	0.709

\*、\*\*、\*\*\*,分别是在0.05、0.01水平(双侧)上显著相关

将年植被覆盖度与当年降水量、生长季(6—9月)降水量、前期降水量(前一年11月至当年5月)、前一年降水量等要素进行回归(表5),发现年植被覆盖度与当年降水量、生长季降水量的关系都达到极显著相关。内蒙古草原为长冬短夏,冬季开始时间从当年10月初到次年4月底,持续7个月时间,夏季为7月底到8月初的半月时间。表5中进行了植被覆盖度与前期降水(与冬季时间几乎一致)的相关分析,发现不同草原类型年植被覆盖度与冬季降水量均为正相关关系,但在草甸草原和典型草原均不显著,说明在草甸草原区和典型草原区冬季降水量可以促进植被覆盖度的增加,但作用不显著。而对较干旱的荒漠草原植被覆盖度起到显著促进作用。将各时段降水因素与年植被覆盖度进行回归分析结果显示,草甸草原和典型草原植被覆盖度均与当年、前期降水的回归效果最好,而荒漠草原植被与生长季、前期降水拟合结果最优。

总体上,内蒙古3种类型草原年植被覆盖度对降水量的响应均表现出在年、季、月尺度上分别受当年降水量、生长季降水量以及6、7、8月份降水量显著影响的特征。

#### 4 讨论

从样地光合植被覆盖度以及降水年际变化趋势可以看出(图2),不同类型草原区植被覆盖度与降水量均具有很好的相关关系, $f_{pv}$ 值变化曲线都与降水量变化曲线波动情况基本一致,也发现某些年份植被覆盖度并

不能与降水量很好地吻合,可能是草原植被覆盖度对降水存在一定滞后效应或相对于降水的变化而言植被结构更趋于稳定。

对 3 个草原多年  $f_{pv}$  月平均值与多年月平均降水量进行相关性分析发现:草原区月植被覆盖度对降水量的响应存在时滞效应,这与穆少杰、张戈丽等人<sup>[3,20]</sup> 研究结果基本一致。不管是在年尺度还是月尺度上,相比草甸草原区和典型草原区,荒漠草原植被覆盖度对降水更加敏感,这与许旭研究结果一致<sup>[11]</sup>。

本文对植被覆盖度与降水的相关性做了分析,比较细致地探讨了植被覆盖度受不同时间降水影响的规律。以往文献<sup>[21-22]</sup> 很多都认为年际尺度上,植被覆盖度主要受降水影响,而月季尺度上,植被受温度和降水综合因素影响大于单因子的影响。作为重要的气象因素,温度对于植被的影响不容忽视,但经过分析,内蒙古 3 种类型草原的 5—10 月逐月植被覆盖度,与前期月均温,年植被覆盖度与生长季、非生长季的均温在多数情况下关系不大。也就是说,对于内蒙古草原植被,降水量对植被覆盖度起着决定性的作用<sup>[23-24]</sup>。这与孟梦<sup>[25]</sup> 研究结果较吻合,她认为内蒙古 NDVI 与气温和降水之间的关系表现出空间差异,17.6% 的面积与降水显著相关,仅有 0.4% 的区域与气温显著相关,降水对 NDVI 的影响比气温更为显著。因此,本文以降水量作为主要气象因素,分析了其对植被覆盖度的影响。

文中重点研究了光合植被覆盖度对降水的定量响应关系,可为土壤侵蚀动态监测中消除降水波动的影响提供理论依据和具体算法。在地表覆盖对土壤侵蚀的影响中,非光合植被覆盖度也起着重要作用,需要进一步研究。总植被覆盖度(光合植被覆盖度+非光合植被覆盖度)需要根据具体研究区不同地物特征的光谱反射机理出发改进像元三分模型,增强非光合植被覆盖度反映地物信息的准确程度,进一步量化光合植被覆盖度、非光合植被覆盖度和裸土以及三者的交互作用,为区域土壤侵蚀动态监测与评估提供依据。

## 5 结论

本文通过对内蒙古 3 种草原类型 2002—2016 年间的光合植被覆盖度和同期降水进行分析,得出如下结论:

(1) 2002—2016 年间草甸草原、典型草原和荒漠草原多年平均光合植被覆盖度  $f_{pv}$  分别为 46.5%、36.3% 和 22.4%;草甸草原  $f_{pv}$  随时间变化呈不显著增长趋势(斜率为 0.29%/a),典型草原和荒漠草原  $f_{pv}$  呈不显著下降趋势(斜率分别为 -0.04%/a 和 -0.21%/a)。

(2) 2002—2016 年 3 个草原区多年平均降水量分别为 341.0、299.7、295.4 mm,降水量随年际变化都呈现不显著波动上升趋势,年内降水差异较大。

(3) 内蒙古草原的月植被覆盖度对月降水量存在明显的 1—2 个月滞后效应和显著的累积效应,且表现出越干旱的草原类型滞后效应越明显的特征;相比草甸草原和典型草原,荒漠草原植被对降水量变化更加敏感。

(4) 3 类草原年植被覆盖度对降水量的响应,均表现出在年、季、月尺度上分别受当年降水量、生长季降水量以及 6、7、8 月份降水量显著影响的特征;3 类草原年植被覆盖度与生长季降水线性拟合结果都较好。

## 参考文献(References):

- [1] Nagler P L, Inoue Y, Glenn E P, Russ A L, Daughtry C S T. Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2/3): 310-325.
- [2] 孙根年,王美红. 内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 140-144.
- [3] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,刚成诚,周伟,居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [4] 彭飞,范闻捷,徐希孺,刘星. 2000—2014 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化分析. *北京大学学报:自然科学版*, 2017, 53(3): 563-572.
- [5] 李林叶,田美荣,梁会,陈艳梅,冯朝阳,梁开跃,钱金平. 2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 584-591.
- [6] 焦全军,付安民,张肖,孙涛,张苏. 基于 MODIS 数据的锡林郭勒草原植被覆盖变化及驱动因子分析. *北京工业大学学报*, 2017, 43

(5): 659-664.

- [7] 张圣微,张睿,刘廷玺,徐冉,张鹏. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析. 农业机械学报,2017,48(3): 253-260.
- [8] 李兰花,孙树光,萨仁格日勒,胡涛. 希拉穆仁草原荒漠化现状评价. 内蒙古草业,2012,24(2): 31-34.
- [9] 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报,2010,25(3): 407-414.
- [10] 张清雨,赵东升,吴绍洪,戴尔阜. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. 地理科学,2013,33(5): 594-601.
- [11] 许旭,李晓兵,梁涵玮,黄玲梅. 内蒙古温带草原区植被盖度变化及其与气象因子的关系. 生态学报,2010,30(14): 3733-3743.
- [12] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [13] Guerschman J P, Hill M J, Renzullo L J, Barrett D J, Marks A S, Botha E J. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 928-945.
- [14] 王光镇,王静璞,韩柳,柴国奇,王周龙. 基于实测光谱模拟 Landsat-8 OLI 数据估算非光合植被覆盖度. 地球信息科学学报,2018,20(11): 1667-1678.
- [15] 李涛,李晓松,李飞. 基于 Hyperion 的锡林郭勒草原光合植被、非光合植被覆盖度估算. 生态学报,2015,35(11): 3643-3652.
- [16] 王光镇,王静璞,邹学勇,王周龙,宗敏. 基于像元三分模型的锡林郭勒草原光合植被和非光合植被覆盖度估算. 生态学报,2017,37(17): 5722-5731.
- [17] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,冯朝阳,吕世海,尚建勋. 内蒙古地区近 25 年植被对气温和降水变化的影响. 生态环境学报,2011,20(11): 1594-1601.
- [18] 张新时. 中华人民共和国植被图 1: 1 000 000. 北京: 地质出版社,2007.
- [19] 包刚,吴琼,阿拉腾图雅,包玉海. 近 30 年内蒙古气温和降水量变化分析. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版,2012,41(6): 668-674.
- [20] 张戈丽,徐兴良,周才平,张宏斌,欧阳华. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. 地理学报,2011,66(1): 47-58.
- [21] 秦福莹. 蒙古高原植被时空格局对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学,2019: 120-120.
- [22] 春花. 近 30 年内蒙古气候变化趋势及其对草原区植被覆盖变化的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学,2014: 59-59.
- [23] 阿荣,毕其格,董振华. 基于 MODIS/NDVI 的锡林郭勒草原植被变化及其归因. 资源科学,2019,41(7): 1374-1386.
- [24] 张清雨,吴绍洪,赵东升,戴尔阜. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应. 自然资源学报,2013,28(5): 754-764.
- [25] 孟梦,牛铮. 近 30a 内蒙古 NDVI 演变特征及其对气候的响应. 遥感技术与应用,2018,33(4): 676-685.