黑河中游荒漠生态系统归一化植被指数对降水的响应

李 芳^{1,2} 赵文智^{2*}

¹中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; ²中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000

摘 要 降水是荒漠生态系统主要的水分来源, 是植被结构和功能变化的根本驱动力。该研究以黑河中游砾质荒漠(砾漠)和沙质荒漠(沙漠)为研究对象, 基于2000–2012年中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取的归一化植被指数(NDVI)数据以及日降水数据, 运用多元线性回归法, 分析了砾漠和沙漠植被生长季(5–9月)、生长季早期(5–6月)和晚期(7–9月)累积NDVI ($NDVI_{INT}$, INT 表示某时间段的累积值)对冷季降水(P_c , 前一年9月至当年2月累积降水)、暖季降水(P_w , 当年3月至8月累积降水)、前一年生长季NDVI_{INT} ($NDVI_{INT-pys}$)以及干湿气候期(干旱期: 2001–2003; 湿润期: 2004–2007年)的响应。研究结果表明: (1)砾漠植被生长季NDVI_{INT}年际变化的影响因素排序为 $NDVI_{INT-pys} > P_c > P_w$, 沙漠植被NDVI_{INT}则为 $P_w > NDVI_{INT-pys}$; 砾漠生长季NDVI_{INT}早期NDVI_{INT}年际变化的影响因素排序为 $NDVI_{INT-pys} > P_c$, 晚期则为 $NDVI_{INT-pys} > P_c = P_w$; 而沙漠生长季早期NDVI_{INT}年际变化的影响因素为 $NDVI_{INT-pys}$, 晚期是 P_w 。(2)在干湿气候期内, 降水量并非是影响荒漠NDVI_{INT}变化的关键因子。干湿气候期交替时, 砾漠NDVI_{INT}较沙漠增加明显; 湿润期内, 湿润期持续的长短是影响两种生境植被NDVI_{INT}的关键因子, 以沙漠较为明显。黑河中游砾漠和沙漠植被生产力对冷暖季降水及干湿气候期响应具有明显的差异, 但总体显示出荒漠植被生产力对降水响应具有滞后性特征。以上结论可为揭示荒漠植被生产力对降水的响应机理提供参考。

关键词 累积归一化植被指数($NDVI_{INT}$); 冷季降水; 暖季降水; 干湿气候期; 滞后性; 生态水文

引用格式: 李芳, 赵文智 (2016). 黑河中游荒漠生态系统归一化植被指数对降水的响应. 植物生态学报, 40, 1245–1256. doi: 10.17521/cjpe.2015.0389

Changes in normalized difference vegetation index of deserts and dunes with precipitation in the middle Heihe River Basin

LI Fang^{1,2} and ZHAO Wen-Zhi^{2*}

¹Research Institute of Grassland Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China; and ²Institute of Northwestern Eco-environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Lanzhou 730000, China

Abstract

Aims Precipitation is the major water source for desert ecosystems, with its temporal dynamics significantly driving the changes of ecosystem structure and function in desert regions. The objectives of this study are to evaluate the changes in normalized difference vegetation index (NDVI) with seasonal precipitation and different climate years in two cover types (desert and dune).

Methods Based on the daily rainfall dataset of 2000–2012 in the middle Heihe River Basin in Northwest China and the NDVI extracted from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) images, we performed linear regression analysis to examine the correlation of $NDVI_{INT}$ (accumulated NDVI) with precipitation in two cover types (desert and dune). Two measures of the precipitation are P_c (cool-season precipitation from last September to late February) and P_w (warm-season precipitation in between March and August), while NDVI was characterized with $NDVI_{INT-pys}$ (previous-year during the different climate years (dry: 2001–2003, wet: 2004–2007)) and the different periods of a growing season (i.e. whole growing season from May through September, early growing season in between May and June, and late growing season in between July and September).

Important findings We found that: (1) the determinants of growing season $NDVI_{INT}$ and their order were $NDVI_{INT-pys} > P_c > P_w$ for the deserts, while the order was $P_w > NDVI_{INT-pys}$ for the dunes. The determinants and their order of $NDVI_{INT}$ in early growing season were $NDVI_{INT-pys} > P_c$ for the desert, while they were $NDVI_{INT-pys} > P_c =$

收稿日期Received: 2015-10-28 接受日期Accepted: 2016-07-23

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

P_w for the late growing season. However, for the dunes, $NDVI_{INT}$ of the early and late growing season appeared determined by $NDVI_{INT-pys}$ and P_w , respectively. (2) During the dry and wet periods, precipitation was not a significant factor influencing $NDVI_{INT}$ for the desert and dune. However, significant increases in $NDVI_{INT}$ were observed at dune under wet condition. With the wet years continued, the length of the wet years become an important determinant of $NDVI_{INT}$ at both cove types, particularly at dune. In addition, it appeared that different changes in $NDVI$ with precipitation existed between the two cover types, but with very similar effects of time-lag. These findings provide useful references for further understanding the mechanisms of $NDVI$ changes with precipitation.

Key words accumulated normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT}$); precipitation of cold season; precipitation of warm season; dry and wet climate period; lag time; ecohydrology

Citation: Li F, Zhao WZ (2016). Changes in normalized difference vegetation index of deserts and dunes with precipitation in the middle Heihe River Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1245–1256. doi: 10.17521/cjpe.2015.0389

黑河流域位于我国西北干旱区, 是我国第二大陆内河流域, 以生态环境极为脆弱的荒漠景观为主。降水是荒漠植被生长的主要水分来源, 是其结构和功能变化的根本驱动力(Weltzin *et al.*, 2003), 因此荒漠植被对降水的响应非常敏感(赵文智和常学礼, 2014)。在全球气候变化背景下, 黑河中游近50年降水量呈缓慢增加的趋势, 平均每10年增加4.75 mm (王素萍等, 2011; 孟秀敬等, 2012), 且降水的年际年内变异增大, 表现为干湿年份的交替或干湿气候期的交替, 夏季降水减少, 秋冬降水增加, 以及大降水事件出现的频率增加(Weltzin *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2015)。

植被生产力是表征生态系统状态的核心指标, 是植被结构和功能的综合体现(Shi *et al.*, 2014)。荒漠植被生产力与降水的关系是干旱区生态水文研究中的关键问题(李晓兵等, 2000; Rustad, 2008)。长期以来, 干旱半干旱区植被生产力与降水的关系研究集中于不同的时空尺度, 空间尺度的研究表明多年平均降水量可解释大于50%的植被地上净初级生产力($ANPP$)的变化(Knapp & Smith, 2001; Bai *et al.*, 2008), 而在时间尺度的研究则主要集中在年、季和月等较长时间尺度降水对生态系统的影响, 且研究表明年降水量仅可解释20%–40% $ANPP$ 的年际变化(Bai *et al.*, 2004; Reichmann *et al.*, 2013; Sala *et al.*, 2014), 这是由于降水在时间序列上的高度变异性以及植被生产力对降水响应的滞后性影响植物个体的生态适应性(Zhao & Liu, 2010)、群落的种群增补(Noy-Meir, 1973; Swetnam & Betancourt, 1998)、生态系统气体交换和水碳平衡(董云社等, 2005; Ospina *et al.*, 2012)使得时间尺度上 $ANPP$ 与降水的关系较为复杂(Williams &

Albertson, 2006)。例如: Robinson等(2013)研究指出季节降水对植被生产力年际变化的解释率高于年降水, 说明植被生产力可能对某个或某几个时间段的降水作用响应明显而非年降水的综合作用; Peters等(2014)指出北美Chihuahuan荒漠豆科灌木在连续湿润年份可以更好地完成种群增补, $ANPP$ 随湿润年的持续呈指数增长趋势, 说明降水通过改变植被结构而影响后期植被对降水的响应能力(Yahdjian & Sala, 2006)。

阐明荒漠生态系统植被生产力对降水格局的响应特征及机制, 是理解荒漠生态系统对干旱环境适应的基础。我国黑河流域中下游主要景观类型为砾质荒漠(砾漠)和沙质荒漠(沙漠)。已有研究表明砾漠和沙漠生境植被生产力对夏季(6–8月)降水格局表现为不同的响应特征: 砾漠常出现多次生产力高峰, 而沙漠为单次生产力峰值, 常见于一年生植物生长最为旺盛的8月底(Li *et al.*, 2013)。但在时间尺度上, 上述两种荒漠植被对降水格局的响应研究还很薄弱, 其中两种生境植被 $NDVI$ 如何响应冷暖季降水和干湿气候期变化迄今鲜见报道。本文将以此为研究重点, 确定沙漠和砾漠生境冷暖季降水和前一年 $NDVI$ 对当年 $NDVI$ 年际变化的解释率; 分析沙漠和砾漠生境 $NDVI$ 对干湿气候期的响应特征与机制。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与群落调查方法

研究区位于中国科学院临泽内陆河流域研究站(简称临泽站)北部6 km处的砾漠区和东北部5 km处的半固定沙漠区, 是巴丹吉林沙漠和张临高绿洲的交汇处(图1)。属大陆性中温带干旱气候, 气候干燥,

图1 研究区概况。

Fig. 1 The locations of study area.

多大风, 太阳辐射强烈, 昼夜温差大, 年平均气温 7.6°C , 年蒸发量 $2\,390\text{ mm}$, 相对湿度 46% 。常年以西北风为主, 风沙活动强烈, 年平均风速为 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大风速 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2013年8月对所选的沙漠研究区进行了植被群落调查, 在研究区内随机选取14个样地, 样地面积 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$, 每个样地设置3个 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ 的样方, 调查每个样方内的灌木和草本植物种类、株数、冠幅、株高。群落主要木本植物为沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 和泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*), 主要草本植物有沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 和白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus*) 等一年生植物, 群落盖度和物种丰富度分别为 30% 和 18 。土壤为风沙土 (表1)。

2012年8月对所选砾漠研究区进行了群落调查, 在研究区内沿南北走向设置3条平行样线, 样线间隔 $1\,000\text{ m}$, 每条样线按间隔 600 m 选择6个面积为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ 的样方, 调查每个样方内的植物的种类、株数、冠幅、高度。群落灌木种类有红砂 (*Reaumuria soongorica*) 和泡泡刺, 主要草本植物有雾冰藜、白茎盐生草和沙葱 (*Allium mongolicum*) 等, 群落盖度和物种丰富度分别为 14% 和 11 (表1)。土壤为灰棕漠土。

1.2 数据获取和处理

1.2.1 累积归一化植被指数 ($NDVI_{\text{INT}}$) 数据获取和处理

本研究选取2000–2012年生长季 (5–9月) Terra和Aqua卫星搭载的MODIS传感器, 250 m 空间分辨率、8天时间分辨率、轨道号 h05/v25 的表面反射率 MOD09Q1 和 MYD09Q1 数据, 共249景, 下载地址为 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>。

该数据已经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等预处理, 且已采用8天最大值合成法以减少云、大气和太阳高度角等的影响。采用MODIS投影转换工具 (MRT) 将MOD09Q1 和 MYD09Q1 数据 Sinusoidal 投影转换为 Transverse Mercator 投影。通过对红光 (Red) 和近红外光 (NIR) 波段的地表反射率数据进行线性变化即 $(NIR - Red) / (NIR + Red)$, 获取2000–2012年生长季 $NDVI$ 数据集。 $NDVI$ 表征了植被密度和生长情况, 被广泛用作 $ANPP$ 的替代指标。所选砾漠和沙漠研究区面积分别为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ (即 20×20 像元), 通过研究区边界裁剪确定两种生境2000–2012年8天时间分辨率 $NDVI$ 数据集。生长季及早晚期 $NDVI_{\text{INT}}$ (INT 表示某时间段的累积值) 的划分: 将5月到9月8天时间分辨率 $NDVI$ 的累积值确定为当年的生长季 $NDVI_{\text{INT}}$, 然后将生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 划分为生长季早期 (5–6月) 和生长季晚期 (7–9月) $NDVI_{\text{INT}}$ 。

1.2.2 降水数据获取和处理

本文1968–2002年日降水数据来自于中国气象科学数据共享服务网 (<http://www.cma.gov.cn>), 2002–2012年日降水观测资料来自于临泽站气象站。冷暖季降水的划分: 将前一年9月到当年8月的累积降水量确定为一个水文年降水量 (P_h), 然后将水文年降水划分为前一年的秋季降水 (9–11月) 和冬季降水 (12月至次年2月), 当年的春季降水 (3–5月) 和夏季降水 (6–8月), 其中前一年秋冬降水确定为冷季降水 (P_c), 当年春夏降水为暖季降水 (P_w)。干湿气候期的划分: 由于1981–2010年水文年的多年平均降水量为 109.7 mm , 所以将水文年降水量小于 109.7 mm 的年份确定为干旱年份, 大于 109.7 mm 的年份为湿润年份, 得出2001–2003和2004–2007年分别为干旱 (年均 $P_h = 74.9\text{ mm}$) 和湿润气候期 (年均 $P_h = 128.2\text{ mm}$) (表2)。此划分方法参考了Peters等 (2014)。

1.3 统计分析

利用多元线性回归分析, 将冷季和暖季降水作为预测变量, 确定荒漠生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 响应冷季和暖季降水的标准化回归平方和 (R^2) 和标准化偏回归平方和 (r^2) (徐向宏和何明珠, 2010), 即冷季和暖季降水对荒漠生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 年际变化的整体的和各自的解释率 (Knapp *et al.*, 2006); 同理, 将水文年降水和前一年生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 作为预测变量, 确定水文年降水和前一年生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 对荒漠生长季 $NDVI_{\text{INT}}$ 年际变化的整体的和各自的解释率。最终确

表1 研究区沙质荒漠和砾质荒漠生境植被和土壤特征(平均值±标准误差)
Table 1 Vegetation and soil characteristics of desert and dune ecosystem located in study area (mean ± SE)

特征 Characteristics		沙质荒漠 Dune	砾质荒漠 Desert
植被特征 Vegetation properties	灌木盖度 Shrub cover (%)	12.2 ± 2.8	11.2 ± 1.4
	草本盖度 Grass cover (%)	17.5 ± 2.1	2.4 ± 0.3
	植被高度 Vegetation height (cm)	67 ± 23	19 ± 9
	归一化植被指数均值 Average normalized difference vegetation index (NDVI) ¹⁾	0.132 ± 0.014	0.075 ± 0.008
	物种丰富度 Species richness	18	11
	建群种 Dominant species	泡泡刺 <i>Nitraria sphaerocarpa</i> , 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i> 90–7–3 ²⁾	红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> , 泡泡刺 <i>Nitraria sphaerocarpa</i> 73–23–4 ³⁾
土壤特征 Soil properties	砂粒-粉粒-黏粒 Sandy-silt-clay (0–20 cm) (%)		
	容重 Bulk density (0–20 cm) (g·m ⁻³)	1.57 ± 0.10 ⁴⁾	1.63 ± 0.19 ³⁾
	总孔隙度 Pore space (0–20 cm) (%)	>39	39 ± 7 ³⁾
	土壤水分 Soil water content ⁵⁾ (0–20 cm)(%)	1.78 ± 0.46	2.10 ± 0.68
	土壤水分 Soil water content ⁵⁾ (20–40 cm)(%)	2.09 ± 0.42	2.81 ± 0.62
	土壤水分 Soil water content ⁵⁾ (40–60 cm)(%)	2.13 ± 0.60	2.27 ± 0.31
	土壤水分 Soil water content ⁵⁾ (60–180 cm)(%)	2.02 ± 2.23	1.79 ± 0.33

1), 2000–2012年生长季(5–9月)归一化植被指数(NDVI)的均值。2)、3)、4), 数据分别来自文献陈小洪等(2009)、王蕙等(2010)、刘继亮等(2015)。5), 2002–2012年4–9月的土壤水分的均值。
1), average NDVI is the average value over the growing season (May to September) from 2000 to 2012. 2), 3) and 4), the data of soil physical properties were collected from the literature (Chen *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2015). 5), average soil water content during April to September from 2002 to 2012.

表2 沙质荒漠和砾质荒漠研究区干湿气候期划分
Table 2 Major characteristics of precipitation in the study area during the different hydrological years in the study basin

年份 Years	降水 Precipitation (mm)	气候期 Climate period	年份 Year	降水 Precipitation (mm)	气候期 Climate period
1999	75.8	非干旱或湿润期 No dry or wet period	2008	111.6	非干旱或湿润期 No dry or wet period
2000	118.4		2009	87.3	
2001	55.7	干旱期 Dry period	2010	143.5	
2002	106.4		2011	188.1	
2003	62.5		2012	105.8	
2004	134.3	湿润期 Wet period	2013	113.2	
2005	116.2		平均值* Mean*	109.7	
2006	122.2				
2007	140.2				

*表示1981–2010年水文年降水的均值, 据此确定气候期。
* average value of hydrological year precipitation from 1981 to 2010 for delineating climate periods.

定生长季NDVI_{INT}年际变化的影响因素及其解释率的大小, 其结果在0.05水平上检验其显著性。本研究的统计分析在SPSS (IBM SPSS Statistics 19)中完成, 所有绘图于Origin 8.0中完成。

2 结果分析

2.1 研究区降水特征

研究区1968–2000年平均年降水量为108 mm; 降水主要集中在6–8月, 约占全年降水量的62%; 全年以小降水事件(< 5 mm)为主, 约占降水事件的79%和年降水量的31%; 大降水事件(>10 mm)约占降水事件的8%和年降水量的43%。而2001–2012年的平均年降水量为113 mm; 降水也主要集中在6–8

月, 约占全年降水量的57%; 全年以小降水事件(<5 mm)为主, 约占降水事件的77%和年降水量的28%; 大降水事件(>10 mm)约占降水事件的12%和年降水量的53% (图2)。相比于1968–2000年降水, 2001–2012年年降水量增加($F = 0.392, p = 0.535$), 暖季降水量降低($F = 2.674, p = 0.109$), 冷季降水量增加($F = 2.733, p = 0.106$)。

小降水事件(< 5 mm)和大降水事件(> 10 mm)的发生次数和降水量在两个时间段(1968–2000和2001–2012)以及四季(春夏秋冬)的 F 值统计显示(表3): 小降水事件和大降水事件的发生次数和降水量在四季之间的差异显著($p < 0.001$), 但仅小降水事件的发生次数在两个时间段差异显著($p = 0.014$), 大降水事件的发

图2 临泽降水特征。“a”表示1968–2000年降水数据;“b”为2001–2012年降水数据。
Fig. 2 Distribution of precipitation in Linze County. “a”, the precipitation data from 1968 to 2000; “b”, the precipitation data from 2001 to 2012.

表3 小降水事件(<5 mm)和大降水事件(>10 mm)的发生次数和降水量在两个时间段(1968–2000和2001–2012)以及四季(春夏秋冬)的F值统计分析
Table 3 F-statistical analysis of frequency and precipitation of small (<5 mm) and large rainfall (>10 mm) events during 1968–2000 and 2001–2012 in different seasons (spring, summer, fall and winter)

降水 Precipitation	因素 Factor	自由度 df	F	p
<5 mm降水 precipitation	发生次数 Frequency	季节 Season	3	18.433
		时间段 Period of time	1	6.223
		季节×时间段 Season × Period of time	3	3.206
	降水量 Precipitation	季节 Season	3	30.218
		时间段 Period of time	1	3.305
		季节×时间段 Season × Period of time	3	2.950
>10 mm降水 precipitation	发生次数 Frequency	季节 Season	3	27.355
		时间段 Period of time	1	0.477
		季节×时间段 Season × Period of time	3	0.606
	降水量 Precipitation	季节 Season	3	25.799
		时间段 Period of time	1	0.147
		季节×时间段 Season × Period of time	3	1.150

生次数和降水量的差异并不显著($p > 0.05$); 小降水事件的发生次数和降水量在四季和时间段二者的交互作用的差异显著($p < 0.05$), 而大降水事件的发生次数和降水量的差异不显著($p > 0.05$)。

2.2 两种生境植被生长季NDVI_{INT}对冷暖季降水的响应

表4是通过多元线性回归确定的荒漠NDVI_{INT}响应冷季和暖季降水的标准化偏回归平方和(r_c^2 、 r_w^2), 即冷季和暖季降水分别对荒漠NDVI_{INT}年际变化的解释率。结果表明: 砾漠生长季(5–9月) NDVI_{INT} 由冷季和暖季降水共同决定, 解释率分别为29%和17%; 而沙漠植被生长季NDVI_{INT}主要由暖季降水决定, 解释率为29%。生长季早期(5–6月), 砾漠

NDVI_{INT}主要由冷季降水决定(23%), 春季降水对生长季早期植被的生长作用不明显; 而沙漠NDVI_{INT}与冷季和春季降水都没有明显的关系。生长季晚期(7–9月), 砾漠NDVI_{INT}由冷暖季降水共同决定, 且两者的解释率相近, 分别为22%和20%, 而沙漠NDVI_{INT}主要取决于暖季降水, 解释率为34%。

2.3 两种生境植被生长季NDVI_{INT}对水文年降水和前一年NDVI_{INT}的响应

通过多元线性回归确定荒漠NDVI_{INT}响应水文年降水(P_h)和前一年生长季NDVI_{INT} ($NDVI_{INT-pys}$)的标准化偏回归平方和(r_h^2 、 r_{t-1}^2), 即 P_h 和 $NDVI_{INT-pys}$ 分别对荒漠NDVI_{INT}年际变化的解释率(表5)。结果表明: 砾漠和沙漠生长季NDVI_{INT}都由 P_h 和 $NDVI_{INT-pys}$ 共同决定,

表4 沙质荒漠和砾质荒漠生境天然植被生长季(5–9月)、早期(5–6月)和晚期(7–9月)累积归一化植被指数($NDVI_{INT}$)与冷暖季降水的线性回归
Table 4 Linear regression models for the relationships between the accumulated normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT}$) of the entire- (May to September), early- (May to June), and late-growing-season (July to September) precipitation for different periods of the year at dunes and deserts

	研究区 Sites	线性回归方程 Linear regression formula	R^2	r^2
生长季 Growing season	砾质荒漠 Desert	$p_t = 1.037 + 0.003x_c + 0.003x_w$	$R^2 = 0.46^*$	$r_c^2 = 0.29^*$; $r_w^2 = 0.17^*$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 1.480 + 0.005x_c + 0.007x_w$	$R^2 = 0.33^*$	$r_c^2 = 0.03$; $r_w^2 = 0.29^*$
早期 Early	砾质荒漠 Desert	$p_t = 0.492 + 0.001x_c + 0.001x_s$	$R^2 = 0.26^*$	$r_c^2 = 0.23^*$; $r_s^2 = 0.04$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 0.734 + 0.001x_c + 0.002x_s$	$R^2 = 0.08$	$r_c^2 = 0.02$; $r_s^2 = 0.06$
晚期 Late	砾质荒漠 Desert	$p_t = 0.604 + 0.002x_c + 0.002x_w$	$R^2 = 0.42^*$	$r_c^2 = 0.22^*$; $r_w^2 = 0.20^*$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 0.822 + 0.003x_c + 0.002x_w$	$R^2 = 0.35^*$	$r_c^2 = 0.01$; $r_w^2 = 0.34^*$

R^2 和 r^2 表示回归方程的标准化回归平方和与标准化偏回归平方和; p_t 表示生长季 $NDVI_{INT}$; x 表示累积降水量; c 表示冷季; w 表示暖季; s 表示春季; *表示在0.05水平上显著。

Both standardized regression sum of squares (R^2) and standardized partial regression sum of squares (r^2) are shown. p_t represents current year growing season $NDVI_{INT}$. x , cumulative precipitation; c represents cool season; w represents warm season; s represents spring. * represents significant level ($p < 0.05$).

表5 沙质荒漠和砾质荒漠生境天然植被生长季(5–9月)、早期(5–6月)和晚期(7–9月)累积归一化植被指数($NDVI_{INT}$)与水文年降水和前一年生长季 $NDVI_{INT}$ 的线性回归
Table 5 Linear regression models for the relationships between the accumulated normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT}$) of the entire- (May to September), early- (May to June), and late-growing-season (July to September) precipitation and hydrological year precipitation (P_h) and the previous normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT-pys}$) at dune and desert

	研究区 Sites	线性回归方程 Linear regression formula	R^2	r^2
生长季 Growing season	砾质荒漠 Desert	$p_t = 0.384 + 0.003x_h + 0.527p_{t-1}$	$R^2 = 0.73^*$	$r_h^2 = 0.40^*$; $r_{t-1}^2 = 0.34^*$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 0.659 + 0.005x_h + 0.466p_{t-1}$	$R^2 = 0.60^*$	$r_h^2 = 0.35^*$; $r_{t-1}^2 = 0.24^*$
早期 Early	砾质荒漠 Desert	$p_t = 0.245 + 0.001x_c + 0.192p_{t-1}$	$R^2 = 0.47^*$	$r_c^2 = 0.20^*$; $r_{t-1}^2 = 0.27^*$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 0.427 + 0.001x_c + 0.170p_{t-1}$	$R^2 = 0.49^*$	$r_c^2 = 0.01$; $r_{t-1}^2 = 0.48^*$
晚期 Late	砾质荒漠 Desert	$p_t = 0.140 + 0.002x_h + 0.378p_{t-1}$	$R^2 = 0.70^*$	$r_h^2 = 0.34^*$; $r_{t-1}^2 = 0.36^*$
	沙质荒漠 Dune	$p_t = 0.262 + 0.004x_h + 0.325p_{t-1}$	$R^2 = 0.50^*$	$r_h^2 = 0.33^*$; $r_{t-1}^2 = 0.17$

R^2 和 r^2 表示回归方程的标准化回归平方和与标准化偏回归平方和; p_t 表示荒漠生长季 $NDVI_{INT}$; p_{t-1} 表示荒漠前一年生长季 $NDVI_{INT}$; x_h 表示水文年降水量; x_c 表示冷季降水; *表示在0.05水平上显著。

Both standardized regression sum of squares (R^2) and standardized partial regression sum of squares (r^2) are shown; p_t represents the normalized difference vegetation index ($NDVI$) integrated over the current growing season; p_{t-1} represents the $NDVI$ integrated over the previous growing season; x_h represents hydrological year precipitation; x_c , cool season precipitation. * indicates significant level ($p < 0.05$).

解释率(R^2)分别为73%和60%,而两种生境 $NDVI_{INT}$ 对 P_h 和 $NDVI_{INT-pys}$ 的响应则不同。砾漠生长季早期(晚期) $NDVI_{INT}$ 对冷季降水(水文年降水)和 $NDVI_{INT-pys}$ 都具有显著的线性关系,而沙漠生长季早期 $NDVI_{INT}$ 主要取决于 $NDVI_{INT-pys}$,生长季晚期则主要取决于 P_h ,且主要是暖季降水(表3)。

2.4 两种生境植被 $NDVI_{INT}$ 对干湿气候期的响应

沙漠和砾漠生长季早期、晚期以及整个生长季植被 $NDVI_{INT}$ 响应干湿气候期降水量的结果(图3)表明:在干旱期内,除生长季早期植被 $NDVI_{INT}$ 随降水量出现不显著的增加趋势外($p > 0.05$),整个生长季及晚期荒漠 $NDVI_{INT}$ 随降水量增加没有明显变化,说明降水量的增加并没有引起荒漠 $NDVI_{INT}$ 增加;在湿润期内,荒漠 $NDVI_{INT}$ 随降水量增加表现为增加趋势,但不显著($p > 0.05$)。因此可以得出:在干湿气候期内,降水量并非是影响荒漠 $NDVI_{INT}$ 变化的关键因子。

由图4降水数据可知,干旱期和湿润期平均水

文年降水量为74.9 mm和128.2 mm,前一年9月到当年5月平均降水量分别45.0 mm和32.5 mm。沙漠和砾漠整个生长季、生长季早期以及晚期 $NDVI_{INT}$ 响应干湿气候期及其交替的结果(图5)表明:干旱期,除生长季早期2002年由于冷季春季累积降水达84.4 mm使得荒漠 $NDVI_{INT}$ 出现高值外,整个生长季及生长季晚期荒漠 $NDVI_{INT}$ 都较为稳定;干湿气候期交替时,水文年降水量由53.9 mm突增到134.2 mm并没有引起荒漠 $NDVI_{INT}$ 发生明显增加,但砾漠 $NDVI_{INT}$ 较沙漠增长较大;而在湿润期,荒漠 $NDVI_{INT}$ 随湿润期持续时间延长表现为非线性增加趋势,以沙漠较为明显。

3 讨论

3.1 两种生境植被生长季 $NDVI_{INT}$ 对冷暖季降水的响应

本研究表明沙漠和砾漠植被生长季早期 $NDVI_{INT}$ 与春季降水无关(表4),可能是因为研究区

图3 沙质荒漠和砾质荒漠累积归一化植被指数($NDVI_{INT}$)与干湿气候期降水量的关系。三角形、正方形和圆形分别表示干旱气候期、湿润气候期和非干旱或湿润期荒漠 $NDVI_{INT}$; R^2 、 R_d^2 、 R_w^2 和 p 、 p_d 、 p_w 分别表示的是干湿气候期(2001–2007)、干旱期(2001–2003)、湿润期(2004–2007)的调整后决定系数和显著性检验的概率值。

Fig. 3 Relationships between the growing season accumulated normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT}$) (early growing season, late growing season) and precipitation during the wet and dry years in dune and desert ecosystems. Triangles, rectangles and circles indicated $NDVI_{INT}$ in dry years (2001–2003), wet years (2004–2007), and normal years (2000, 2008–2012), respectively. R^2 , R_d^2 , R_w^2 and p , p_d , p_w indicated the adjusted coefficient of determination and the probability values of significance test at dry and wet climate period (2001–2007), dry years, wet years.

春季降水以<5 mm的小降水为主(图2), 且荒漠由于较低的土壤有机质及黏粉粒含量使其土壤持水能力均较弱, 加上春季气温的快速上升, 使得地表土壤蒸发旺盛, 导致春季降水能为植物生长利用所提供的水分有限(Yang *et al.*, 2011; Zeppel *et al.*, 2014)。另外, 生长季早期气温与 $NDVI$ 相关性大于降水, 说明生长季早期气温是决定 $NDVI$ 的重要因子(赵铭石等, 2011)。然而, 砾漠生长季早期 $NDVI_{INT}$ 对冷季降水响

应显著; 而沙漠生长季早期 $NDVI_{INT}$ 与冷季降水无关, 这是由于生长季早期约60%的水分补给来源于冷季降水补给的0–50 cm的浅层土壤水(周海等, 2013); 且砾漠由于黏粉粒含量较多使其浅层土壤持水能力强于沙漠(李玉山, 1983), 使得春季地表土壤水分的蒸发相对较小, 土壤含水量较高(常学向等, 2003), 即累积存储于浅层土壤的冷季降水对砾漠植被生长季早期 $NDVI_{INT}$ 影响明显, 此结果与其

图4 沙质荒漠和砾质荒漠生境降水在干湿气候期的变化。
Fig. 4 Changes of precipitation during the wet and dry years at dune and desert.

他学者指出的前一年冷季降水是植被春季生长关键水分来源的结论(Hamerlynck *et al.*, 2012, 2013; Reichmann *et al.*, 2013)一致。

沙漠和砾漠植被生长季晚期 $NDVI_{INT}$ 对冷季和暖季降水的响应也明显不同。砾漠生长季晚期 $NDVI_{INT}$ 由冷暖季降水共同决定;而沙漠 $NDVI_{INT}$ 则取决于暖季降水,这与两种群落植物功能群组成及土壤质地等因素相关(Byrne *et al.*, 2013)。首先,砾漠植物建群种为 C_3 植物红砂,吸收根主要分布范围为0–80 cm,其86%的根系分布于土壤表层0–30 cm(王敏等, 2013),生长季晚期主要利用较深层土壤水(周海等, 2013),而存储于较深层的土壤水有利于晚期植被生长(Robertson *et al.*, 2009; Thomey *et al.*, 2011; Reichmann *et al.*, 2013)。其次,已有研究表明以红砂为建群种的临泽砾漠区 $NDVI$ 对<30 mm的夏季降水事件响应较小(Li *et al.*, 2013),且砾漠的浅根系草本植物较沙漠分布较少(盖度为2.4%),使其对夏季降水的响应小于沙漠植被。沙漠植物主要为 C_4 灌木泡泡刺,其90%的根系分布于土壤表层0–30 cm(王敏等, 2013),且8月份浅根系一年生草本植物

大量出现(盖度为17.5%),使得沙漠植物根系总体上较砾漠较浅。另外,土壤质地影响土壤的持水能力,随土壤中细粒(黏粉粒)含量增加持水性能增强(李玉山, 1983)。因此,沙漠的浅层土壤持水能力弱于砾漠,沙漠的浅层土壤水分较少,当暖季>5 mm降水事件发生时,降水入渗补给土壤水分,可及时供生长季晚期沙漠植被的生长(Li *et al.*, 2013)。砾漠和沙漠的以上结论分别与Patagonia草地生产力(Milchunas *et al.*, 1994; Oesterheld *et al.*, 2001)以及内蒙古草地生产力响应冷暖季降水的结论(Bai *et al.*, 2004; Zeppel *et al.*, 2014)一致。

3.2 两种生境生长季 $NDVI_{INT}$ 对前一年 $NDVI_{INT}$ 的响应

本研究表明:除降水直接影响植被生产力外,前一年 $NDVI_{INT}$ 是影响荒漠区生长季 $NDVI_{INT}$ 年际变化的另一个主要因素,这与Chihuahua沙漠、Patagonia草地生产力对植被结构滞后响应的结论(Milchunas *et al.*, 1994; Oesterheld *et al.*, 2001; Reichmann *et al.*, 2013)一致。这种滞后性响应表现为:前期降水通过改变植被结构(植被盖度、物种组成、分蘖密度等)而影响晚期植被对降水的响应能力,进而影响植被生产力(Oesterheld *et al.*, 2001; Reichmann *et al.*, 2013)。例如,低降水年份较低的植被分蘖密度限制晚期植被响应降水的能力,而高降水年份较高的植被分蘖密度促进晚期植被响应降水的能力(Reichmann *et al.*, 2013);当生态系统前一年可利用降水低于多年平均值时,当年的植被生产力低于由当年降水量变化引起的生产力的预估值,而当生态系统前一年可利用降水高于多年平均值时,当年的植被生产力高于由当年降水量变化引起的生产力的预估值(Sala *et al.*, 2014)。因此,前期降水通过影响植被结构,从而促进或限制植被对当年降水的响应(Yahdjian & Sala, 2006)。

3.3 两种生境生长季 $NDVI_{INT}$ 对干湿气候期的响应

本研究得出:在干湿气候期内,降水量并非是影响荒漠 $NDVI_{INT}$ 变化的关键因子(图3)。在干湿气候期交替时,湿润期初期 $NDVI_{INT}$ 没有明显增加,但随着湿润年份的持续,湿润年份的长短是决定湿润期荒漠植被 $NDVI_{INT}$ 的关键(图4)。此结果与墨西哥南部Chihuahua沙漠的研究结果(Peters *et al.*, 2014)相一致。这是因为在干旱期,由于植被盖度和密度较小,荒漠生态系统的土壤水分被土壤蒸发所消耗,

图5 沙质荒漠和砾质荒漠生境累积归一化植被指数($NDVI_{INT}$)在干湿气候期的变化。三角形、正方形和圆形分别表示干旱气候期(2001–2003)、湿润气候期(2004–2007)和非干旱或湿润期(2000, 2008–2012)荒漠 $NDVI_{INT}$; 二次函数的自变量(x)表示的是连续湿润的年数。

Fig. 5 Changes of accumulated normalized difference vegetation index ($NDVI_{INT}$) during the wet and dry years at dune and desert. Triangles, rectangles and circles indicated $NDVI_{INT}$ in dry years (2001–2003), wet years (2004–2007) and no-trend years (2000, 2008–2012), respectively. The number of consecutive wet years is indicated in the quadratic function of the independent variable (x).

种群扩张较难, 导致物种死亡及物种对环境的适应性降低, 改变群落组成及生态系统功能。然而, 连续多年湿润对植被生态系统生产力具有积极作用 (Peters *et al.*, 2014), 当连续2–4年为湿润年时, 植物种群扩张明显, 且植被生物量和凋落物增加, 使得灌丛覆盖下土壤水分增加, 植被蒸腾增强, 进而增加植被扩张能力, 提高植被的生产力。

两种生境 $NDVI_{INT}$ 对干湿气候期的响应不同。湿润初期, 砾漠较沙漠 $NDVI_{INT}$ 增加明显, 但随着湿润年份的持续, 沙漠 $NDVI_{INT}$ 的增速高于砾漠。这是由于: 沙漠生境植被建群种为 C_4 植物泡泡刺, 以有性

繁殖为主、无性繁殖为辅适应沙地环境, 扩张其生存空间(庄艳丽等, 2008), 而长期干旱限制植被结构(种子、叶面积、枝条密度和根生物量等)的恢复 (Sala *et al.*, 2014), 使得湿润初期 $NDVI_{INT}$ 无明显增加, 而从连续湿润第2–4年开始, 植被 $NDVI_{INT}$ 呈非线性增长趋势, 表明长期湿润促进泡泡刺种群扩张和增补, 促进 $NDVI_{INT}$ 快速增加。然而, 砾漠生境植被建群种为 C_3 植物红砂, 它以种子和根基劈裂为主要繁殖方式, 枝条被沙埋后, 遇水即可长出不定根 (曾彦军等, 2002)。干湿气候期的交替过程中, 由于红砂为复苏植物, 通过叶片脱落适应干旱, 而降水

恢复时表现为植被的生长恢复(刘玉冰等, 2006), 因此, 砾漠 $NDVI_{INT}$ 随湿润第一年降水量的增加而增加, 表明干旱对砾漠植物种子发芽、植被结构以及种群扩张的影响较沙漠小; 当处于长期湿润年份时, 红砂种子萌发和幼苗建植频发, 种群扩张和增补明显(曾彦军等, 2002), 植被 $NDVI_{INT}$ 增长明显, 但增速低于沙漠 $NDVI_{INT}$ (表3)。

4 结论

本研究重点强调沙漠和砾漠植被对降水格局的响应特征。由于沙漠和砾漠植被结构及土壤质地等因素的影响, 暖季降水以及前一年植被生产力是沙漠植被生长季 $NDVI_{INT}$ 年际变化的主要因素, 而砾漠植被生长季 $NDVI_{INT}$ 年际变化主要由冷季降水及前一年植被生产力共同决定, 体现了冷季降水在砾漠生境中的重要性, 这在一定程度上说明砾漠生境可以适应冷季降水的增加, 沙漠植被的生长则由于暖季降水的减少而受到抑制; 在干湿气候期内, 降水量并非是影响荒漠 $NDVI_{INT}$ 变化的关键因子。干湿气候期交替时, 湿润初期砾漠较沙漠 $NDVI_{INT}$ 增加明显, 但随着湿润年份的持续, 湿润年份的长短是影响湿润期两种生境植被 $NDVI_{INT}$ 的重要因子, 以沙漠较为明显, 这说明了干湿气候期及其交替促进了荒漠植被生产力年际变异的增加。

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB429903)和国家杰出青年科学基金(41125002)。

参考文献

Bai YF, Han XG, Wu JG, Chen ZZ, Li LH (2004). Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 431, 181–184.

Bai YF, Wu JG, Xing Q, Pan QM, Huang JH, Yang DL, Han XG (2008). Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau. *Ecology*, 89, 2140–2153.

Byrne KM, Lauenroth WK, Adler PB (2013). Contrasting effects of precipitation manipulations on production in two sites within the central grassland region, USA. *Ecosystems*, 16, 1039–1051.

Chang XX, Zhao AF, Zhao WZ, Chen HS (2003). Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1, 126–129. (in Chinese with English abstract) [常学向, 赵爱芬, 赵文智, 陈怀顺

(2003). 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况. *水土保持学报*, 1, 126–129.]

Chen XH, Duan ZH, He HZ (2009). Fractal characteristics of soil particle of desert-oasis ecotone. *Soils*, 41, 97–101. (in Chinese with English abstract) [陈小红, 段争虎, 何洪泽 (2009). 荒漠-绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形特征. *土壤*, 41, 97–101.]

Dong YS, Qi YC, Liu JY, Geng YB, Domroes M, Yang XH, Liu LX (2005). Variation characteristics of soil respiration fluxes in four types of grassland communities under different precipitation intensity. *Chinese Science Bulletin*, 50, 583–591. (in Chinese with English abstract) [董云社, 齐玉春, 刘纪远, 耿元波, Domroes M, 杨小红, 刘立新 (2005). 不同降水强度4种草地群落土壤呼吸通量变化特征. *科学通报*, 50, 472–480.]

Hamerlynck EP, Scott RL, Barron-Gafford GA (2013). Consequences of cool-season drought-induced plant mortality to chihuahuan desert grassland ecosystem and soil respiration dynamics. *Ecosystems*, 16, 1178–1191.

Hamerlynck EP, Scott RL, Barron-Gafford GA, Cavanaugh ML, Susan Moran M, Huxman TE (2012). Cool-season whole-plant gas exchange of exotic and native semiarid bunchgrasses. *Plant Ecology*, 213, 1229–1239.

Knapp AK, Burns CE, Fynn RWS, Kirkman KP, Morris CD, Smith MD (2006). Convergence and contingency in production-precipitation relationships in North American and South African C_4 grasslands. *Oecologia*, 149, 456–464.

Knapp AK, Smith MD (2001). Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 291, 481–484.

Li F, Zhao WZ, Liu H (2013). The response of aboveground net primary productivity of desert vegetation to rainfall pulse in the temperate desert region of northwest China. *PLOS ONE*, 8, e73003. doi:10.1371/journal.pone.0073003.

Li F, Zhao WZ, Liu H (2015). Productivity responses of desert vegetation to precipitation patterns across a rainfall gradient. *Journal of Plant Research*, 128, 284–295.

Li XB, Wang Y, Li KR (2000). $NDVI$ sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 55, 82–89. (in Chinese with English abstract) [李晓兵, 王瑛, 李克让 (2000). $NDVI$ 对降水季节性 and 年际变化的敏感性. *地理学报*, 55, 82–89.]

Li YS (1983). The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region. *Acta Ecological Sinica*, 3, 91–101. (in Chinese with English abstract) [李玉山 (1983). 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 3, 91–101.]

Liu JL, Zhao WZ, Li FR (2015). Distribution of ground arthropod community in arid desert in the middle reaches of Heihe River. *Arid Zone Research*, 32, 1192–1200. (in

- Chinese with English abstract) [刘继亮, 赵文智, 李锋瑞 (2015). 黑河中游荒漠地面节肢动物分布特征. 干旱区研究, 32, 1192–1200.]
- Liu YB, Zhang TG, Li XR, Zhang LJ, Bai Y, An LZ, Wang G (2006). Protective mechanism of desiccation tolerance in *Reaumuria soongorica*, Leaf abscission and sucrose accumulation in the stem. *Science in China Series C, Life Science*, 36, 328–333. (in Chinese with English abstract) [刘玉冰, 张腾国, 李新荣, 张丽静, 白琰, 安黎哲, 王刚 (2006). 红砂(*Reaumuria soongorica*)忍耐极度干旱的保护机制: 叶片脱落和茎中蔗糖积累. 中国科学C辑: 生命科学, 36, 328–333.]
- Meng XJ, Zhang SF, Zhang YY (2012). The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi corridor in recent 57 years. *Acta Geographica Sinica*, 67, 1482–1492. (in Chinese with English abstract) [孟秀敬, 张士锋, 张永勇 (2012). 河西走廊57年来气温和降水时空变化特征. 地理学报, 67, 1482–1492.]
- Milchunas DG, Forwood JR, Lauenroth WK (1994). Productivity of long-term grazing treatments in response to seasonal precipitation. *Journal Range Management*, 47, 133–139.
- Noy-Meir I (1973). Desert ecosystems, environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 25–51.
- Oosterheld M, Loreti J, Semmartin M, Sala OE (2001). Inter-annual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous-year production. *Journal of Vegetation Science*, 12, 137–142.
- Ospina S, Rusch GM, Pezo D, Casanoves F, Sinclair FL (2012). More stable productivity of semi natural grasslands than sown pastures in a seasonally dry climate. *PLOS ONE*, 7, e35555. doi:10.1371/journal.pone.0035555.
- Peters D, Yao J, Browning D, Rango A (2014). Mechanisms of grass response in grasslands and shrublands during dry or wet periods. *Oecologia*, 174, 1323–1334.
- Reichmann L, Sala OE, Peters D (2013). Precipitation legacies in desert grassland primary production occur through previous-year tiller density. *Ecology*, 94, 435–443.
- Robertson TR, Bell CW, Zak JC, Tissue DT (2009). Precipitation timing and magnitude differentially affect above-ground annual net primary productivity in three perennial species in a Chihuahuan Desert grassland. *The New Phytologist*, 181, 230–242.
- Robinson TM, La Pierre KJ, Vadeboncoeur MA, Byrne KM, Thomey ML, Colby SE (2013). Seasonal, not annual precipitation drives community productivity across ecosystems. *Oikos*, 122, 727–738.
- Rustad LE (2008). The response of terrestrial ecosystems to global climate change: Towards an integrated approach. *Science of the Total Environment*, 404, 222–235.
- Sala OE, Gherardi LA, Reichmann L, Jobbagy E, Peters D (2014). Legacies of precipitation fluctuations on primary production, theory and data synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society-Biological Sciences*, 367, 3135–3144.
- Shi Z, Thomey ML, Mowll W, Litvak M, Brunsell NA, Collins SL, Pockman WT, Smith MD, Knapp AK, Luo Y (2014). Differential effects of extreme drought on production and respiration, synthesis and modeling analysis. *Biogeosciences*, 11, 621–633.
- Swetnam TW, Betancourt JL (1998). Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest. *Journal of Climate*, 11, 3128–3147.
- Thomey ML, Collins SL, Vargas R, Johnson JE, Brown RF, Natvig DO, Friggens MT (2011). Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 17, 1505–1515.
- Wang H, Zhao WZ, Wu LY (2010). Change of soil physical properties with precipitation gradient in desert region of Hexi corridor. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 30, 46–51. (in Chinese with English abstract) [王慧, 赵文智, 武利玉 (2010). 河西走廊荒漠区土壤物理性质沿降水梯度的变化. 水土保持通报, 30, 46–51.]
- Wang M, Su YZ, Yang R (2013). Allocation patterns of above- and belowground biomass in desert grassland in the middle reaches of Heihe River, Gansu Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 209–219. (in Chinese with English abstract) [王敏, 苏永中, 杨荣, 杨晓 (2013). 黑河中游荒漠草地地上和地下生物量的分配格局. 植物生态学报, 37, 209–219.]
- Wang SP, Song LC, Han YX, Lu DR (2011). Analysis on mean abrupt change of precipitation in Hexi corridor region in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 30, 1286–1293. (in Chinese with English abstract) [王素萍, 宋连春, 韩永翔, 陆登荣 (2011). 近50年河西走廊地区降水均值突变特征分析. 高原气象, 30, 1286–1293.]
- Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, Williams DG, Fay PA, Haddad BM, Harte J, Huxman TE, Knapp AK, Lin GH, Pockman WT, Shaw MR, Small EE, Smith MD, Smith SD, Tissue DT, Zak JC (2003). Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, 53, 941–952.
- Williams CA, Albertson JD (2006). Dynamical effects of the statistical structure of annual rainfall on dryland vegetation. *Global Change Biology*, 12, 777–792.
- Xu XH, He MZ (2010). *Experimental Design, the Design-Expert And SPSS Application*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [徐向宏, 何明珠 (2010). 试验设计与Design-Expert、SPSS应用. 科学出版社, 北京.]
- Yahdjian L, Sala OE (2006). Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the

- Patagonian steppe. *Ecology*, 87, 952–962.
- Yang HJ, Wu MY, Liu WX, Zhang Z, Zhang NL, Wan SQ (2011). Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 17, 452–465.
- Zeng YJ, Wang YR, Zhang BL, Zhuang GH (2002). Reproductive characteristics of *Reaumuria soongorica* populations. *Acta Prataculturae Sinica*, 11, 66–71. (in Chinese with English abstract) [曾彦军, 王彦荣, 张宝林, 庄光辉 (2002). 红砂种群繁殖特性的研究. 草业学报, 11, 66–71.]
- Zeppel MJB, Wilks JV, Lewis JD (2014). Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences*, 11, 3083–3093.
- Zhao MS, Gou XH, Zhou FF, Xie YW, Su JD (2011). Changes in NDVI and its relationship with meteorological factors in the upper-middle Heihe river basin region. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 47, 33–38. (in Chinese with English abstract) [赵铭石, 勾晓华, 周非飞, 颌耀文, 苏军德 (2011). 黑河中上游地区NDVI对气象因子的响应分析. 兰州大学学报(自然科学版), 47, 33–38.]
- Zhao WZ, Chang XL (2014). The effect of hydrologic process changes on NDVI in the desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor. *Science China-Earth Sciences*, 44, 1561–1571. (in Chinese with English abstract) [赵文智, 常学礼 (2014). 河西走廊水文过程变化对荒漠绿洲过渡带NDVI的影响. 中国科学: 地球科学, 44, 1561–1571.]
- Zhao WZ, Liu B (2010). The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1297–1306.
- Zhou H, Zheng XJ, Tang LS, Li Y (2013). Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 665–673. (in Chinese with English abstract) [周海, 郑新军, 唐立松, 李彦 (2013). 准噶尔盆地东南缘多枝怪柳、白刺和红砂水分来源的异同. 植物生态学报, 37, 665–673.]
- Zhuang YL, Zhao WZ, Xie GX, Hu G (2008). The feature of *Calligonum mongolicum* population and its expansion process in sandy habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 1399–1407. (in Chinese with English abstract) [庄艳丽, 赵文智, 谢国勋, 胡广录 (2008). 沙地生境沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 种群特征及其扩张. 生态学报, 28, 1399–1407.]

责任编辑: 梁存柱 责任编辑: 王 葳

植物生态学报官网

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览