

青藏高原不同气候区高寒沙地两种优势植物及其根际土壤的营养特征

苟小林^{1,2} 周青平^{1,2*} 陈有军^{1,2} 魏小星¹ 涂卫国³

¹青海大学畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 西宁 810016; ²西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041; ³四川省自然资源科学研究院, 成都 610015

摘要 为了探究青藏高原寒冷沙地上优势植物及其根际土壤的营养对不同气候的响应过程, 选取半干旱和半湿润沙地上的优势植物中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*)为对象, 调查自然条件下青藏高原半干旱和半湿润沙地上两种植物枝叶和根的碳、氮、磷含量, 及其根际0–10 cm和10–20 cm土壤的有机碳、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、有效磷含量, 并探讨两种优势植物和根际土壤的营养含量的关系及其影响因子。结果表明, 半干旱和半湿润条件下中国沙棘和沙蒿及其根际土壤的营养差异明显。半干旱和半湿润气候条件下两种植物碳、氮、磷的积累差异显著。半湿润条件下, 沙蒿根际土壤中的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、有效磷的含量高于半干旱条件, 而中国沙棘根际土壤营养的结果却相反。不同气候条件下, 沙蒿和沙棘的营养和根际土壤的营养显著相关, 两种植物的养分比差异显著, 沙蒿氮磷比与其根际土壤的氮磷比以及中国沙棘的碳氮比与其根际土壤的碳氮比显著负相关。

关键词 青藏高原; 植物养分; 土壤养分; 中国沙棘; 沙蒿

苟小林, 周青平, 陈有军, 魏小星, 涂卫国 (2018). 青藏高原不同气候区高寒沙地两种优势植物及其根际土壤的营养特征. 植物生态学报, 42, 133–142. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0120

Characteristics of nutrients in two dominant plant species and rhizospheric soils in alpine desert of the Qinghai-Xizang Plateau under contrasting climates

GOU Xiao-Lin^{1,2}, ZHOU Qing-Ping^{1,2*}, CHEN You-Jun^{1,2}, WEI Xiao-Xing¹, and TU Wei-Guo³

¹Key Laboratory of Use of Forage Germplasm Resources on Tibetan Plateau of Qinghai Province, Institute of Grazing & Veterinarian, Qinghai University, Xining 810016, China; ²Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; and ³Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, China

Abstract

Aims This study was conducted to determine the responses of nutrients in plants and rhizospheric soils to climate in alpine-cold desert on the Qinghai-Xizang Plateau.

Methods Tissue samples for two dominant plant species, *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* and *Artemisia desertorum*, and associated rhizospheric soil samples were collected from sites representing semi-arid and sub-humid climates in the alpine-cold desert on the Qinghai-Xizang Plateau. Measurements were made on the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in roots and shoots, as well as on organic carbon, total nitrogen, total phosphate, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphate in rhizospheric soils in the 0–10 cm and 10–20 cm layer. The relationship between nutrients in plant tissues and rhizospheric soils and the influencing factors were analyzed.

Important findings There were significant differences between the semi-arid and the sub-humid sites in tissue nutrients and rhizospheric soil nutrients for the two species. Specifically, the contents of carbon, nitrogen, phosphorus in plant tissues differed significantly between the semi-arid and the sub-humid sites. Soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphate for the rhizosphere of *A. desertorum* were significantly higher on site under sub-humid climate than that under semi-arid climate; whereas the trend was reversed for the rhizosphere of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*. We found significant relationships between the tissue nutrients and soil nutrients, and significantly different plant nutrient ratios between the two species. There

收稿日期Received: 2017-05-16 接受日期Accepted: 2017-12-02

基金项目 国家科技支撑计划(2015BAC05B01)、四川省重点专项(2015SZ0062)。Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAC05B01) and the Special Funds of Sichuan, China (2015SZ0062).

* 通信作者Corresponding author (qingzh@yahoo.com.cn)

were negative correlations between tissues and rhizospheric soils in N:P ratio for *A. desertorum* and C:N ratio for *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* under different climates.

Key words Qinghai-Xizang Plateau; vegetal nutrients; soil nutrients; *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*; *Artemisia desertorum*

Gou XL, Zhou QP, Chen YJ, Wei XX, Tu WG (2018). Characteristics of nutrients in two dominant plant species and rhizospheric soils in alpine desert of the Qinghai-Xizang Plateau under contrasting climates. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 133–142. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0120.

干旱和湿润的气候环境形成了不同的陆地生态景观, 并极大地影响着植物的生长发育过程(Dos Santos *et al.*, 2013; Tomlinson *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2014; Riah *et al.*, 2014)。干旱和湿润环境对植物的生命组成元素碳(C)、氮(N)、磷(P)等产生影响。在对气候变化敏感的贫瘠沙地环境条件下, 植物养分对不同气候的响应情况尚不明确。对气候变化敏感的青藏高原(Jing *et al.*, 2015; Lehnert *et al.*, 2016)是我国重要的生态组成部分(Ding *et al.*, 2017), 其跨度较大, 涵盖了半湿润、半干旱、干旱等多个气候带, 生境类型丰富(林振耀和吴祥定, 1981)。全球气候变暖改变了部分区域降水格局, 降水格局的变化(Polade *et al.*, 2014; Trenberth *et al.*, 2014)对生态系统造成影响(杨元合和朴世龙, 2006; 何奕忻等, 2014; 张宪洲等, 2015), 以青藏高原东南缘的半湿润和东北缘的半干旱气候区为代表的气候区域, 出现了不同面积的草地沙化(李广泳等, 2014; 苟小林等, 2016)。青藏高原东南缘半湿润气候带和东北缘半干旱气候带的沙地同属于高海拔寒冷地区, 生长着相同的优势植物, 但对相同植物的养分特征在半干旱和半湿润环境下的差异研究极为缺乏。首先, 半干旱和半湿润的气候差异可能影响沙地植物对土壤养分的利用过程, 进而影响植物在生命史不同阶段的生长和繁殖, 特别是繁殖策略的选择方向会极大地影响生态系统的更新能力和物种多样性(Aronson & Shmida, 1992; Báez *et al.*, 2013), 但极少数的研究展示了高寒半干旱和半湿润条件下沙地植物对土壤养分的利用情况。其次, 植物自身养分情况也可能随着半干旱和半湿润气候差异形成的环境差异表现出不同的响应结果, 导致植物器官养分的分配差异(赵广东等, 2003; 叶鑫等, 2014), 但是并没有相关研究明确解释植物器官养分对气候差异的响应情况。再者, 半干旱和半湿润气候条件可能对土壤造成影响, 土壤养分对半干旱和半湿润气候条件可能有不同的响应情况(Yahdjian & Sala, 2010), 这

可能对植物生长造成影响。现阶段的研究对青藏高原半干旱和半湿润气候条件下植物和土壤缺乏较为系统的比较, 特别是在自然生态系统中, 有关研究极少。

川西北和青海湖东分属于青藏高原东南缘和东北缘, 是青藏高原典型的寒冷草地; 川西北属于长江和黄河流域重要的水源地, 属于半湿润气候, 青海湖东是青海湖流域重要的水源涵养地, 属于半干旱气候, 川西北和青海湖东对于水源涵养和生物多样性保护具有非常重要的意义(王莺等, 2015)。两区域具有非常明显的地理气候特征: 1)两区域属于青藏高原寒冷地区, 海拔都在3 000 m以上, 两区域草地生态系统退化较严重, 有不同程度和不同面积的沙化草地(骆成凤等, 2013; 苟小林等, 2016); 2)两区域沙地分布有相同的高寒灌丛和半灌木; 3)川西北每年降水相对丰沛, 较为湿润, 且雨热同季, 而青海湖东年降水相对较少, 较为干旱; 4)两区域每年生长季较短, 每年11月到次年4月为土壤冻结期。本文以川西北和青海湖东高寒沙地上具有代表性的植物中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*)为优势的灌木和半灌木, 以自然生态系统为基础, 通过调查自然条件下半湿润(川西北)和半干旱(青海湖东)沙地上沙棘和沙蒿整株及其根际土壤碳、氮、磷含量的分布, 分析长期的半湿润和半干旱环境对青藏高原高寒沙地优势植物及根际土壤养分的影响, 为高寒沙地相同植物及其根际土壤养分对不同气候环境的响应研究提供基础。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省阿坝州红原县日干乔生态保护区(31.51°–33.19° N, 101.51°–103.23° E, 海拔3 460 m)和青海省海北州海晏县湖东生态保护区(36.36°–37.05° N, 100.01°–100.86° E, 海拔3 150 m)。

日干乔生态保护区属于青藏高原东南缘,为半湿润气候,年降水量相对充沛;青海湖湖东生态保护区属于青藏高原东北缘,为半干旱气候,年降水量相对较少(林振耀和吴祥定,1981)。两地区为典型的高寒草地,高温和主要降水集中于每年5到10月,半干旱气候地区近5年的年平均气温为1.69 °C,年降水量440.86 mm;而半湿润气候地区近5年的年平均气温为2.55 °C,年降水量801.76 mm。土壤表层主要为高寒草甸土,沙化地区以风沙土为主。红原县主要以牦牛为放牧家畜,而海晏县以藏绵羊为放牧家畜。地表植物主要以适应高寒环境的中国沙棘、沙蒿、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等为优势植物。

1.2 样地设置及样品采集处理

2016年8月中旬在两个研究区内分别随机选择3块100 × 100 m的样地,在每块样地内分别选取3个中国沙棘和沙蒿的植物群落,每个群落内随机采集3株中国沙棘和沙蒿的地上枝叶及地下根,并沿主根采集0–10 cm和10–20 cm的根际土壤,样品保存于放有冰袋的泡沫箱中,低温环境下迅速带回实验室进行样品分析。每块样地内的9个样品收集混合为一个样品,作为一个重复,半湿润和半干旱高寒沙地上植物和土壤样品各3个重复。

植物样品带回实验室初步粉碎后,在65 °C下烘干至恒质量,再利用粉碎机彻底粉碎后进行植物碳(C)、氮(N)、磷(P)含量测定。土壤样品带回后过1 mm筛,去除沙土中的石子和根系等杂物。将过筛后的土壤分为两份:一份于室温下风干,用于土壤pH值、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(STN)、土壤全磷(STP)含量测定;新鲜土壤存储于4 °C,用于土壤硝态氮(SNN)、土壤铵态氮(SAN)、土壤有效磷(SAP)、土壤水分含量测定。

1.3 测定及计算方法

植物样品测定:植物样品C利用重铬酸钾和浓硫酸氧化,硫酸亚铁滴定方法进行测定;N利用浓硫酸混合加速剂蒸馏方法进行测定;P利用钼锑抗比色法(鲁如坤,2000)进行测定。

土壤样品测定:土壤pH值利用土壤pH计测定;土壤水分在105 °C下烘干至恒质量测定;SOC利用高温外热重铬酸钾氧化-容量法进行测定;STN利用凯氏法进行测定;STP利用酸溶-钼锑抗比色方法进行测定;SNN利用双波长比色法进行测定;SAN利用靛酚蓝比色方法进行测定;SAP利用钼锑抗比色

法进行测定(鲁如坤,2000)。

计算方法:植物碳氮比(C:N) = C/N;植物碳磷比(C:P) = C/P;植物氮磷比(N:P) = N/P;土壤碳氮比(SC:SN) = SOC/STN;土壤碳磷比(SC:SP) = SOC/STP;土壤氮磷比(SN:SP) = STN/STP。

1.4 统计分析

利用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)分析半干旱和半湿润沙地上植物和土壤不同养分含量的差异,显著水平为 $p < 0.05$ 。利用Pearson相关分析法分析土壤和植物养分含量之间的关系。所有数据通过SPSS 19.0计算。

2 结果

2.1 不同气候区域植物器官养分含量差异

长期的半干旱和半湿润气候条件下,沙蒿根和枝叶C、N、P含量差异显著;中国沙棘根和枝叶C、N含量差异显著,但P含量差异不显著(图1)。在高寒沙地上,半湿润条件下的沙蒿根和枝叶C含量显著高于半干旱条件(图1A),中国沙棘根的C含量规律与沙蒿相似,但是中国沙棘枝叶的C含量显著低于半干旱条件(图1B)。长期半湿润条件下两种植物根和枝叶的N含量都明显低于半干旱条件(图1C、1D)。高寒沙地上半湿润条件下两种植物根和枝叶的P含量都低于半干旱条件,但只有沙蒿达到显著水平(图1E、1F)。

2.2 不同气候条件下植物根际土壤pH值及养分含量的差异

不同气候条件下,各植物根际土壤pH值均大于7(图2A、2B)。半湿润条件下的土壤pH值明显低于半干旱条件下的土壤pH值(图2A)。不同气候条件下,中国沙棘根际0–10 cm与10–20 cm土壤的pH值结果相反,并且差异显著(图2B)。

不同气候条件下植物根际土壤C、N含量差异显著(图2C、2D、2E、2F),P含量差异不显著(图2G、2H)。半湿润条件下沙蒿根际土壤SOC和STN含量高于半干旱条件(图2C、2E),中国沙棘根际土壤SOC和STN含量低于半干旱条件(图2D、2F),并且差异显著;而不同气候条件下两种植物根际土壤STP含量间差异不明显(图2G、2H)。

不同气候条件下两种植物根际土壤溶解性N(SAN和SNN)和SAP含量差异显著(图3A、3B、3C、3D、3E、3F)。半湿润条件下沙蒿根际土壤溶解性N

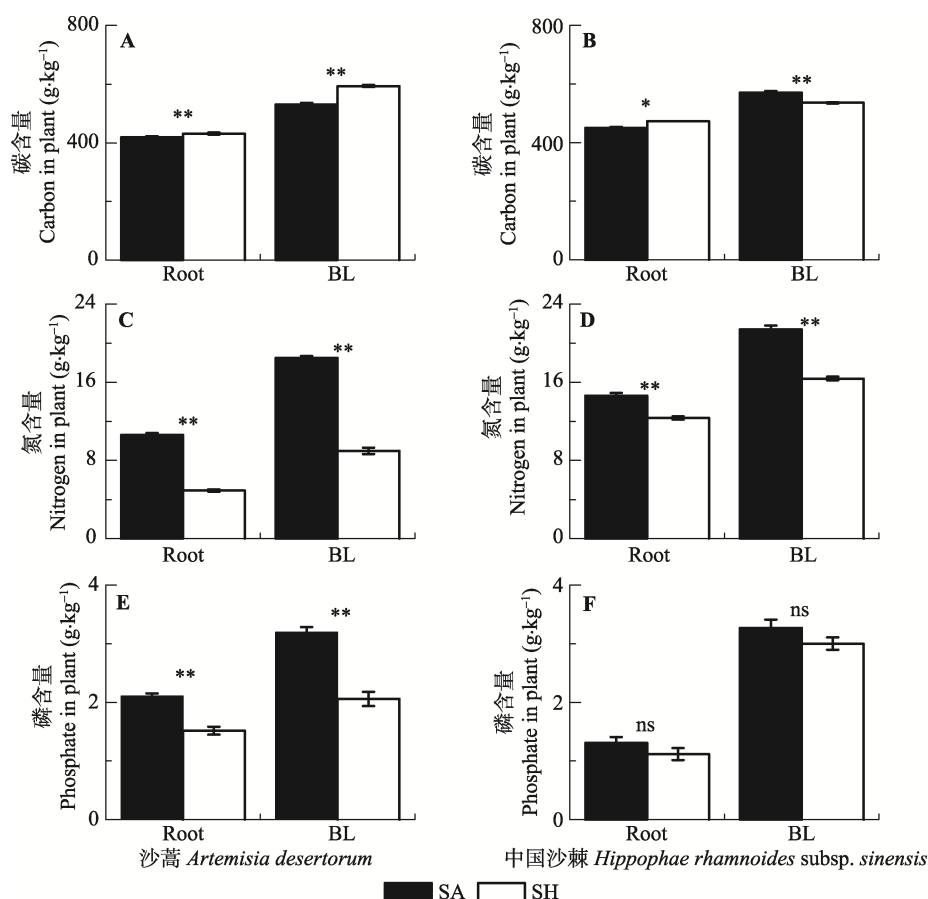


图1 两种气候条件下植物器官主要养分含量的比较(平均值±标准偏差, $n = 3$)。*、**和ns分别代表半干旱和半湿润条件下显著性水平小于0.05、小于0.01和不显著。BL, 枝和叶; Root, 根系。SA, 半干旱; SH, 半湿润。

Fig. 1 Comparisons of major nutrients in plant tissues between two different climatic conditions (mean \pm SD, $n = 3$). *, ** and ns indicate that the differences between semi-arid and sub-humid conditions are significant at the levels of 0.05 and 0.01, and not significant, respectively. BL, branches and leaves; Root, roots. SA, semi-arid; SH, semi-humid.

和SAP含量明显高于半干旱条件下(图3A、3C、3E), 半湿润条件下中国沙棘根际土壤溶解性N和SAP含量却明显低于半干旱条件下(图3B、3D、3F)。

2.3 不同气候条件下植物各器官养分比和根际土壤养分比

在半干旱和半湿润气候条件下植物各器官养分比与根际土壤的养分比有显著差异(表1)。在不同气候条件下, 除中国沙棘根的N:P, 中国沙棘枝叶的C:P, 沙蒿根际土壤的SC:SN和中国沙棘根际土壤SN:SP (10–20 cm土层)差异不显著外, 其余养分比值差异都达到了显著水平。半湿润条件下两种植物根及枝叶的C:N和C:P都高于半干旱条件, 而N:P却低于半干旱条件(表1)。半湿润条件下中国沙棘根际土壤SC:SN、SC:SP、SN:SP低于半干旱条件; 而沙蒿根际土壤除去10–20 cm土层的SC:SN外, 其余养分比均表现为半湿润条件下高于半干旱条件下, 跟中国沙棘根际土壤养分比值结果相反(表1)。

2.4 不同气候条件下植物各器官养分和根际土壤养分的关系

在半干旱和半湿润气候条件下, 沙蒿的枝叶、根和根际土壤C、N、P显著相关, 中国沙棘枝叶、根和根际土壤C、N相关性显著(表2)。在不同气候条件下, 沙蒿枝叶的C与0–10 cm和10–20 cm两个土层的SOC含量显著正相关; 沙蒿枝叶和根的N含量与土壤中的STN、SNN、SAN含量显著负相关; 沙蒿枝叶和根的P含量和土壤中的SAP显著负相关(表2)。在不同气候条件下, 中国沙棘枝叶的C含量与土壤中SOC含量显著正相关, 而中国沙棘根的C含量却与土壤中的SOC含量显著负相关; 中国沙棘根和枝叶的N含量与土壤中的STN、SNN、SAN含量显著正相关(表2)。

2.5 不同气候条件下植物各器官养分比和根际土壤养分比的相关关系

在半干旱和半湿润气候条件下, 沙蒿枝叶及根

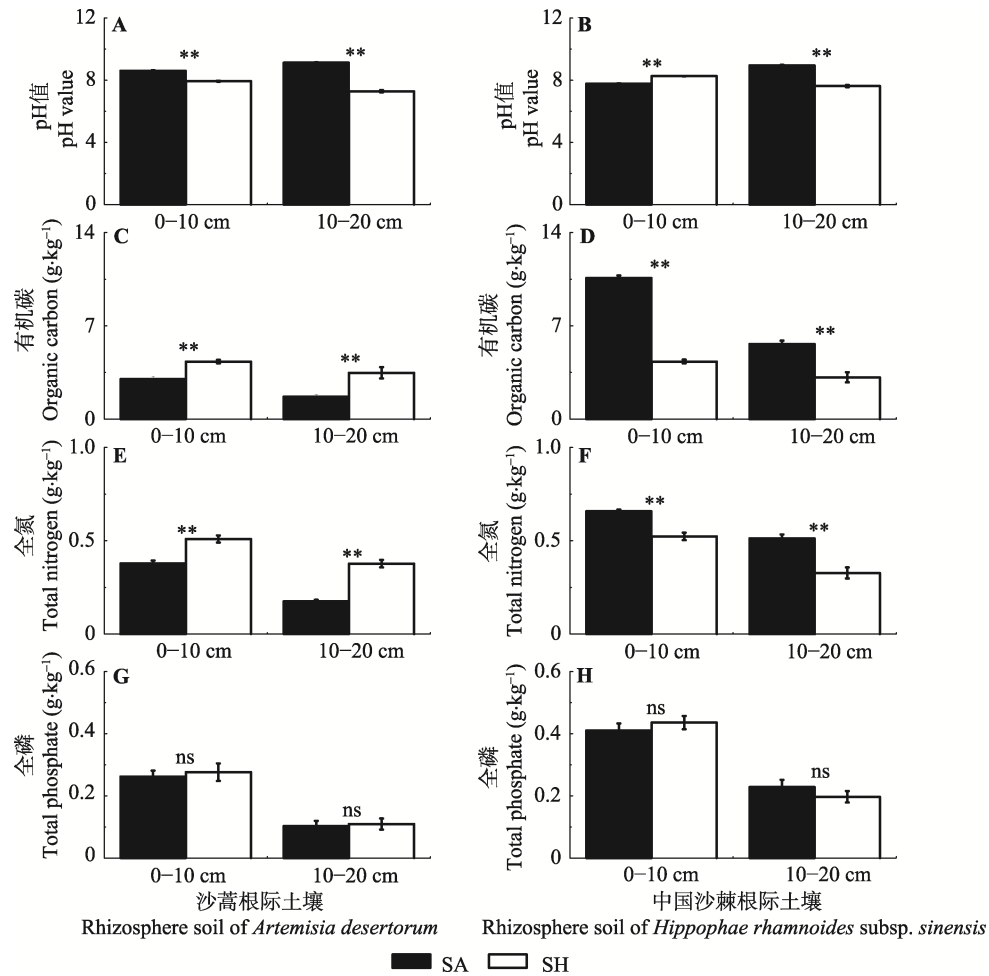


图2 两种气候条件下植物根际土壤主要养分含量和pH值的比较(平均值±标准偏差, $n = 3$)。**和ns分别代表半干旱和半湿润环境下显著性水平小于0.01和不显著。SA, 半干旱; SH, 半湿润。

Fig. 2 Comparisons of major nutrients and pH value in rhizospheric soils between two different climatic conditions (mean \pm SD, $n = 3$). ** and ns indicate that the differences between semi-arid and sub-humid conditions are significant at the 0.01 level, and not significant, respectively. SA, semi-arid; SH, sub-humid.

的N:P和土壤SN:SP显著相关, 中国沙棘枝叶C:N和土壤SC:SN显著相关, 中国沙棘根C:N、C:P分别和土壤SC:SN、SC:SP显著相关(表3)。在半干旱和半湿润条件下, 沙蒿N:P和土壤SN:SP呈显著负相关关系, 而C:N与土壤SC:SN无明显相关性, C:P只在10–20 cm土壤表现显著正相关性(表3)。在半干旱和半湿润条件下, 中国沙棘枝叶及根的C:N和土壤SC:SN显著负相关, 中国沙棘根的C:P和土壤SC:SP显著负相关, 而中国沙棘根的N:P和土壤SN:SP并没有显著的相关性(表3)。

3 讨论

青藏高原高寒沙地在长期半干旱和半湿润气候条件下, 中国沙棘和沙蒿的养分含量在不同气候条件下差异明显。在半湿润条件下, 沙蒿整株和中国

沙棘根系碳的积累增加, 但中国沙棘枝叶碳的含量降低; 而两种植物全株氮含量在半湿润条件下明显降低; 两种植物全株的磷含量也在半湿润条件下降低。部分研究表明气候变暖导致青藏高原降水增加(Wang *et al.*, 2008; You *et al.*, 2015), 半湿润气候区域的降水主要集中在生长季节, 雨热同季, 丰沛的降雨使植物生长迅速(黄占斌等, 2002; 郭忠升和邵明安, 2003), 有机质积累量增加, 特别是沙蒿地上部分生长迅速(Schwinning *et al.*, 2003)。半湿润气候条件下植物的光合作用强烈, 促进有机质的积累, 但半干旱条件下, 植物除了进行光合作用, 还需要增加氮和磷的吸收量, 增加部分糖和蛋白质含量, 用以增加自身抗旱能力(周向睿等, 2014), 因此半湿润条件下植物氮和磷含量低于半干旱条件下。在高寒地区, 部分植物器官氮和磷含量随着环境因子发

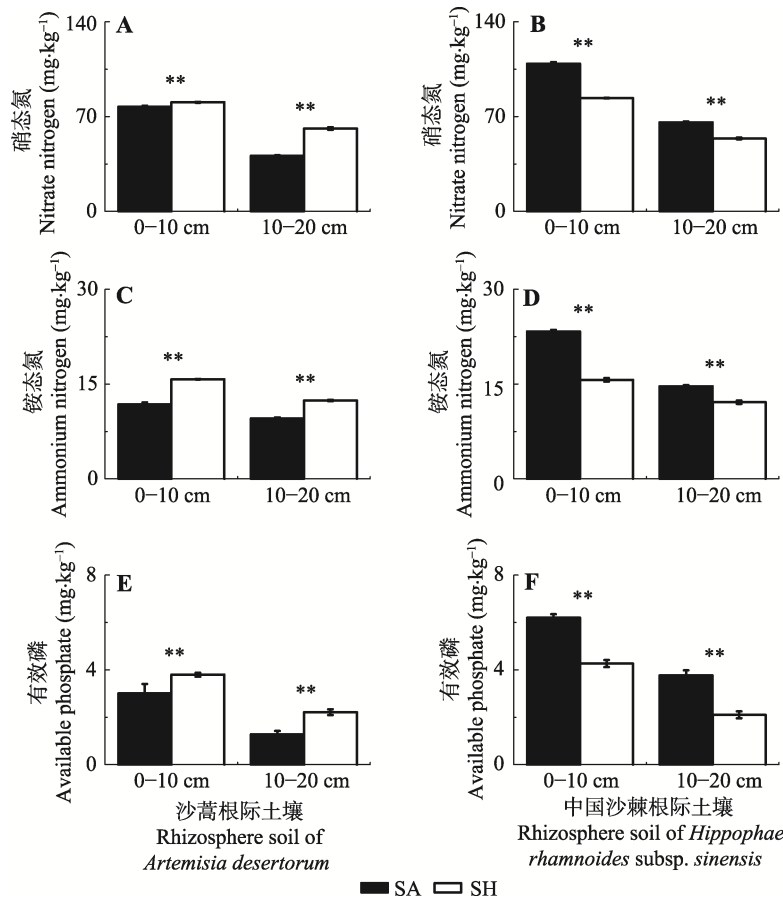


图3 两种气候条件下植物根际土壤溶解性养分的比较(平均值±标准偏差, $n = 3$)。**代表半干旱和半湿润件下显著性水平小于0.01。SA, 半干旱; SH, 半湿润。

Fig. 3 Comparisons of dissolved nutrients in rhizospheric soils between two climatic conditions (mean \pm SD, $n = 3$). ** indicate that the differences between semi-arid and sub-humid conditions are significant at the 0.01 level. SA, semi-arid; SH, sub-humid.

表1 两种气候条件下植物器官及土壤养分分的比较
Table 1 Comparisons of nutrient ratios in tissues and rhizospheric soils between two climatic conditions

植物或根际土壤类型 Plant or rhizospheric soil	器官或土层 Tissue or soil layer	气候 Climate	碳氮比 C:N (SC:SN)		碳磷比 C:P (SC:SP)		氮磷比 N:P (SN:SP)	
			M	SD	M	SD	M	SD
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	根 Roots	SA	39.493 ^b	0.906	199.046 ^b	5.998	5.039 ^a	0.037
		SH	87.596 ^a	1.527	284.528 ^a	10.402	3.247 ^b	0.063
	枝叶 Branches and leaves	SA	28.666 ^b	0.531	166.050 ^b	6.180	5.791 ^a	0.120
		SH	66.201 ^a	2.762	289.091 ^a	19.047	4.366 ^b	0.175
中国沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> subsp. <i>sinensis</i>	根 Roots	SA	30.730 ^b	0.514	344.732 ^b	23.832	11.213 ^a	0.634
		SH	38.210 ^a	0.489	425.255 ^a	38.610	11.139 ^a	1.155
	枝叶 Branches and leaves	SA	26.596 ^b	0.755	174.307 ^a	6.129	6.561 ^a	0.384
		SH	32.697 ^a	0.497	178.604 ^a	7.098	5.461 ^b	0.137
沙蒿根际土壤 Rhizospheric soil of <i>Artemisia desertorum</i>	0–10 cm	SA	7.950 ^a	0.752	11.528 ^b	1.336	1.448 ^b	0.048
		SH	8.481 ^a	0.519	15.761 ^a	2.008	1.860 ^a	0.215
	10–20 cm	SA	9.694 ^a	1.384	16.668 ^b	3.595	1.709 ^b	0.180
		SH	9.233 ^a	1.247	32.617 ^a	7.558	3.540 ^a	0.787
中国沙棘根际土壤 Rhizospheric soil of <i>Hippophae rhamnoides</i> subsp. <i>sinensis</i>	0–10 cm	SA	16.085 ^a	0.334	25.857 ^a	1.315	1.607 ^a	0.066
		SH	8.266 ^b	0.440	9.920 ^b	0.242	1.202 ^b	0.061
	10–20 cm	SA	10.999 ^a	0.486	24.849 ^a	2.788	2.265 ^a	0.305
		SH	9.567 ^b	0.303	16.118 ^b	3.423	1.679 ^a	0.309

不同小写字母表示同一指标在半干旱和半湿润沙地上差异显著($p < 0.05$); 相同小写字母表示同一指标在半干旱和半湿润沙地上差异不显著($p > 0.05$)。M, 平均值; SA, 半干旱; SC:SN, 土壤碳氮比; SC:SP, 土壤碳磷比; SD, 标准偏差; SH, 半湿润; SN:SP, 土壤氮磷比。Different lowercase letters indicate significant difference ($p < 0.05$) between the semi-arid and sub-humid conditions, and the same lowercase letters indicate insignificant difference ($p > 0.05$). M, mean value; SA, semi-arid; SC:SN, the ratio of soil carbon to nitrogen; SC:SP, the ratio of soil carbon to phosphorus; SD, standard deviation; SH, sub-humid; SN:SP, the ratio of soil nitrogen to phosphorus.

表2 两种植物养分含量与土壤养分含量之间的相关系数

Table 2 Pearson's correlations of nutrients between plant tissues and rhizospheric soils

土层 Soil layer	养分 Nutrient	沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>						中国沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> subsp. <i>sinensis</i>					
		枝叶 Branches and leaves			根 Roots			枝叶 Branches and leaves			根 Roots		
		C	N	P	C	N	P	C	N	P	C	N	P
0–10 cm	SOC	0.96**	−0.975**	−0.953**	0.827*	−0.976**	−0.949**	0.983***	0.992***	0.802 ^{ns}	−0.972**	0.986***	0.765 ^{ns}
	STN	0.989***	−0.985***	−0.991***	0.861*	−0.979**	−0.986***	0.979**	0.968**	0.799 ^{ns}	−0.954**	0.994***	0.707 ^{ns}
	STP	0.42 ^{ns}	−0.348 ^{ns}	−0.427 ^{ns}	0.596 ^{ns}	−0.333 ^{ns}	−0.308 ^{ns}	−0.415 ^{ns}	−0.654 ^{ns}	−0.425 ^{ns}	0.65 ^{ns}	−0.481 ^{ns}	−0.293 ^{ns}
	SNN	0.915*	−0.942**	−0.908*	0.77 ^{ns}	−0.951**	−0.926**	0.982***	0.991***	0.816*	−0.967**	0.985***	0.768 ^{ns}
	SAN	0.997**	−0.996***	−0.990***	0.906*	−0.993***	−0.979**	0.974**	0.996***	0.779 ^{ns}	−0.98**	0.978**	0.752 ^{ns}
	SAP	0.906*	−0.866*	−0.899*	0.903*	−0.848*	−0.833*	0.966**	0.99***	0.746 ^{ns}	−0.974**	0.968**	0.712 ^{ns}
10–20 cm	SOC	0.945**	−0.963**	−0.939**	0.761 ^{ns}	−0.96**	−0.955**	0.982***	0.964**	0.781 ^{ns}	−0.954**	0.969**	0.845*
	STN	0.995***	−0.996***	−0.997***	0.867*	−0.994***	−0.994***	0.982***	0.958**	0.813*	−0.931**	0.963**	0.849*
	STP	0.239 ^{ns}	−0.193 ^{ns}	−0.192 ^{ns}	0.615 ^{ns}	−0.185 ^{ns}	−0.112 ^{ns}	0.576 ^{ns}	0.703 ^{ns}	0.376 ^{ns}	−0.77 ^{ns}	0.664 ^{ns}	0.253 ^{ns}
	SNN	0.993***	−0.999***	−0.987***	0.875*	−0.997***	−0.987***	0.991***	0.983***	0.798 ^{ns}	−0.97**	0.995***	0.761 ^{ns}
	SAN	0.994***	−0.996***	−0.986***	0.9*	−0.995***	−0.979**	0.963**	0.99***	0.732 ^{ns}	−0.98**	0.961**	0.738 ^{ns}
	SAP	0.986***	−0.98**	−0.989***	0.902*	−0.977**	−0.982**	0.933**	0.994***	0.75 ^{ns}	−0.993**	0.956**	0.714 ^{ns}

*, **, ***, ns分别代表显著性水平小于0.05、0.01、0.001和差异不显著。C, 植物有机碳; N, 植物全氮; P, 植物全磷; SAN, 根际土壤铵态氮; SAP, 根际土壤有效磷; SNN, 根际土壤硝态氮; SOC, 根际土壤有机碳; STN, 根际土壤全氮; STP, 根际土壤全磷。

*, **, *** and ns indicate that correlations are significant at the levels of 0.05, 0.01, and 0.001, and not significant, respectively. C, organic carbon in plant; N, total nitrogen in plant; P, total phosphorus in plant; SAN, ammonium nitrogen in rhizospheric soil; SAP, available phosphorus in rhizospheric soil; SNN, nitrate nitrogen in rhizospheric soil; SOC, organic carbon in rhizospheric soil; STN, total nitrogen in rhizospheric soil; STP, total phosphorus in rhizospheric soil.

表3 气候条件下植物器官及根际土壤的养分比的相关系数

Table 3 Pearson's correlations of nutrient ratios between plant tissues and rhizospheric soils under two climatic conditions

植物 Plant	土层 Soil layer (cm)	养分比 Nutrient ratio	枝叶 Branches and leaves			根 Roots		
			C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	0–10	SC:SN	0.397 ^{ns}	0.332 ^{ns}	−0.505 ^{ns}	0.422 ^{ns}	0.336 ^{ns}	−0.482 ^{ns}
		SC:SP	0.826*	0.758 ^{ns}	−0.901*	0.833*	0.807 ^{ns}	−0.842*
		SN:SP	0.864*	0.814*	−0.902*	0.86*	0.87*	−0.843*
	10–20	SC:SN	−0.218 ^{ns}	−0.29 ^{ns}	0.114 ^{ns}	−0.22 ^{ns}	−0.261 ^{ns}	0.189 ^{ns}
		SC:SP	0.884*	0.869*	−0.865*	0.866*	0.89*	−0.843*
		SN:SP	0.923**	0.937*	−0.865*	0.906*	0.94**	−0.873*
中国沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> subsp. <i>sinensis</i>	0–10	SC:SN	−0.983***	−0.358 ^{ns}	0.919*	−0.983***	−0.85*	0.015 ^{ns}
		SC:SP	−0.993***	−0.35 ^{ns}	0.938**	−0.981**	−0.815*	0.076 ^{ns}
		SN:SP	−0.991***	−0.369 ^{ns}	0.933**	−0.959**	−0.738 ^{ns}	0.183 ^{ns}
	10–20	SC:SN	−0.892*	−0.152 ^{ns}	0.895*	−0.907*	−0.862*	−0.118 ^{ns}
		SC:SP	−0.8 ^{ns}	−0.359 ^{ns}	0.709 ^{ns}	−0.843*	−0.909*	−0.316 ^{ns}
		SN:SP	−0.689 ^{ns}	−0.373 ^{ns}	0.583 ^{ns}	−0.731 ^{ns}	−0.843*	−0.374 ^{ns}

*, **, ***, ns分别代表显著性水平小于0.05、0.01、0.001和差异不显著。C:N, 植物碳氮比; C:P, 植物碳磷比; N:P, 植物氮磷比; SC:SN, 土壤碳氮比; SC:SP, 土壤碳磷比; SN:SP, 土壤氮磷比。

*, **, *** and ns indicate that correlations are significant at the levels of 0.05, 0.01, and 0.001, and not significant, respectively. C:N, the ratio of plant carbon to nitrogen; C:P, the ratio of plant carbon to phosphorus; N:P, the ratio of plant nitrogen to phosphorus; SC:SN, the ratio of soil carbon to nitrogen; SC:SP, the ratio of soil carbon to phosphorus; SN:SP, the ratio of soil nitrogen to phosphorus.

生变化(杨阔等, 2010), 但是在高寒地区不同气候条件下, 对植物器官碳、氮、磷含量变化机理的认识仍然缺乏, 还需要进行深入研究。

各植物根际土壤中养分含量在半干旱和半湿润气候条件下差异显著。半湿润气候条件下沙蒿根系土壤中的碳、氮、磷含量较高, 而中国沙棘根际土壤碳、氮和有效磷的含量却较低。沙蒿为丛生型密

集半灌木, 在地上成片分布, 郁闭度极高, 群落中极难分布其他物种, 当年生长迅速, 并且冬季地上部分枯萎, 可以依靠根茎进行无性繁殖。在半湿润条件下, 降水相对充沛, 地下根系快速生长, 地上和地下生物量较大(Wilcox *et al.*, 2004)。在非生长季节, 地上凋落物和地下根能够提供碳、氮、磷, 反馈至土壤中(Jackson & Caldwell, 1989; 吴伊波等,

2014), 更重要的是, 沙蒿地上郁闭度较高(马全林等, 2012), 能有效地减缓降雨造成的土壤淋溶作用, 减少土壤养分损失; 非生长季节地表水分缺乏, 凋落物的分解过程缓慢, 养分归还过程缓慢, 在长期的分解和积累作用下, 半湿润气候沙地上沙蒿根际土壤养分含量变高。而中国沙棘地上部分并不密集, 群落中广泛分布着其他物种, 特别是在半湿润气候沙地上, 禾本科、菊科草本植物是中国沙棘群落中的常见物种, 随着降水条件改善, 草本物种的生长吸收土壤中的养分, 使土壤中的养分含量下降; 并且由于地上郁闭度不高, 降水可能造成的淋溶也减少了土壤中溶解性的养分, 在长期淋溶作用下, 半湿润沙地上中国沙棘根际土壤中溶解性的铵态氮、硝态氮、有效磷含量在半湿润气候条件下显著下降(图3)。而在半干旱条件下, 中国沙棘植株低矮, 相对匮乏的降水可能相对减少了对土壤养分的淋溶作用, 土壤养分损失较少。半湿润条件可能通过对土壤的淋溶作用影响了植物根际土壤养分, 但是其机理需要深入探讨。

不同气候条件下植物和土壤养分比差异显著。在半湿润气候条件下, 相对丰沛的降水使植物快速生长, 植物体碳含量增加, 碳氮比和碳磷比变高(图2; 表3), 但相对丰沛的降水同样可能导致土壤淋溶作用, 淋溶可能导致土壤溶解性氮和有效磷流失(Hu *et al.*, 2008), 土壤氮和磷含量减少。沙蒿群落密集茂盛, 地表郁闭度高, 对淋溶产生的阻碍作用较为良好, 能有效地减缓土壤淋溶作用, 并且地表生物量较大, 形成的凋落物分解后的养分对地下生态系统具有良好的反馈作用(Kemp *et al.*, 2003), 因此沙蒿根际土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比在降雨沙地上高于干旱沙地(表3)。而中国沙棘对降水阻碍较小, 可能产生的淋溶作用使中国沙棘根际土壤的养分比值和沙蒿根际土壤养分比值出现了相反的结果(表3)。

在不同的气候条件下, 沙蒿的枝叶、根和根际土壤碳、氮、磷显著相关, 沙蒿枝叶及根的氮磷比和土壤氮磷比显著负相关, 中国沙棘枝叶及根的氮磷比和土壤的氮磷比没有显著相关性。半干旱和半湿润气候差异极可能通过对高寒沙地植物生理以及土壤养分淋溶产生影响(Yahdjian & Sala, 2010), 从而影响高寒沙地植物及其根际土壤的养分分布特征, 特别是青藏高原高寒沙地土壤贫瘠条件下, 土壤养

分含量极容易受到外界条件的影响, 半干旱和半湿润气候降水差异显著, 可能对高寒沙地植物及土壤养分产生影响, 但是具体的影响机制和响应方式还需要进一步的研究。

4 结论

青藏高原高寒沙地上, 半干旱和半湿润气候条件下中国沙棘和沙蒿不同器官及其根际土壤养分具有明显差异。半湿润条件沙蒿碳的积累量增加, 半干旱条件下中国沙棘和沙蒿氮和磷积累量增加。半湿润条件下沙蒿根际土壤中的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、有效磷的含量高于半干旱气候, 而中国沙棘根际土壤的结果却相反。不同气候条件下沙蒿和中国沙棘的养分和根际土壤养分显著相关, 两种植物养分比差异显著, 沙蒿氮磷比与其根际土壤氮磷比以及中国沙棘碳氮比与其根际土壤碳氮比呈负相关关系。有关高寒沙地上不同气候条件下优势植物及其根际土壤养分差异机理需要深入探究。

致谢 四川省教育厅创新团队项目(14TD0049)和青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室(2017-ZJ-Y12)资助本研究, 特此致谢。

参考文献

- Aronson J, Shmida A (1992). Plant species diversity along a Mediterranean-desert gradient and its correlation with interannual rainfall fluctuations. *Journal of Arid Environments*, 23, 235–235.
- Báez S, Collins SL, Pockman WT, Johnson JE, Small EE (2013). Effects of experimental rainfall manipulations on Chihuahuan Desert grassland and shrubland plant communities. *Oecologia*, 172, 1117–1127.
- Ding JZ, Chen LY, Ji CJ, Hugelius G, Li YN, Liu L, Qin SQ, Zhang BB, Yang GB, Li F, Fang K, Chen YL, Peng YF, Zhao X, He HL, Smith P, Fang JY, Yang YH (2017). Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions. *Nature Geoscience*, 10, 420–424.
- Dos Santos CM, Verissimo V, De Lins Wanderley Filho HC, Ferreira VM, Da Silva Cavalcante PG, Rolim EV, Endres L (2013). Seasonal variations of photosynthesis, gas exchange, quantum efficiency of photosystem II and biochemical responses of *Jatropha curcas* L. grown in semi-humid and semi-arid areas subject to water stress. *Industrial Crops and Products*, 41, 203–213.
- Gao L, Zheng M, Fraser M, Huang YS (2014). Comparable hydrogen isotopic fractionation of plant leaf wax

- n*-alkanoic acids in arid and humid subtropical ecosystems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 361–373.
- Gou XL, Tu WG, Li L, Luo XM, Xi H, Fan H, Li S (2016). Relationships between soil factors and plant species diversities of decertified grassland in the north-west Sichuan Province. *Acta Agrestia Sinica*, 24, 768–775. [苟小林, 涂卫国, 李玲, 罗雪梅, 席欢, 樊华, 李森 (2016). 川西北地区沙化草地特征研究. 草地学报, 24, 768–775.]
- Guo ZS, Shao MA (2003). Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1640–1647. [郭忠升, 邵明安 (2003). 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 23, 1640–1647.]
- He YX, Wu N, Zhu QA, Chen H, Zhu D, Peng CH, Yang G, Gao YH, Zhao C (2014). The 5000-year climate change of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and historical ecology of Zoige wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1615–1625. [何奕忻, 吴宁, 朱求安, 陈槐, 朱单, 彭长辉, 杨刚, 高永恒, 赵川 (2014). 青藏高原东北部5000年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展. 生态学报, 34, 1615–1625.]
- Hu K, Li B, Chen D, Zhang Y, Edis R (2008). Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China. *Agricultural Water Management*, 95, 1180–1188.
- Huang ZB, Wu XP, Fang F, Yu MY, Xu BC, Deng XP, Shan L (2002). Effect of soil dry-wet changes and aquasorb treatment on plant growth and water use efficiency. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 8, 600–604. [黄占斌, 吴雪萍, 方峰, 俞满源, 徐炳成, 邓西平, 山仑 (2002). 干湿变化和保水剂对植物生长和水分利用效率的影响. 应用与环境生物学报, 8, 600–604.]
- Jackson RB, Caldwell MM (1989). The timing and degree of root proliferation in fertile-soil microsites for three cold-desert perennials. *Oecologia*, 81, 149–153.
- Jing X, Sanders NJ, Shi Y, Chu HY, Classen AT, Zhao K, Chen LT, Shi Y, Jiang YX, He JS (2015). The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nature Communications*, 6, 8159. DOI: 10.1038/ncomms9159.
- Kemp PR, Reynolds JF, Virginia RA, Whitford WG (2003). Decomposition of leaf and root litter of Chihuahuan desert shrubs: Effects of three years of summer drought. *Journal of Arid Environments*, 53, 21–39.
- Lehnert LW, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J (2016). Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. *Scientific Reports*, 6, 24367. DOI: 10.1038/srep24367.
- Li GY, Li XY, Zhao GQ, Zhang ZH, Li YT (2014). Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 3038–3047. [李广泳, 李小雁, 赵国琴, 张志华, 李岳坦 (2014). 青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征. 生态学报, 34, 3038–3047.]
- Lin ZY, Wu XD (1981). Climatic regionalization of the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 36, 22–32. [林振耀, 吴祥定 (1981). 青藏高原气候区划. 地理学报, 36, 22–32.]
- Lu RK (2000). *Analysis Methods of Soil Agro-Chemistry*. China Agriculture Technology Press, Beijing. [鲁如坤 (2000). 土壤农化分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Luo CF, Xu CJ, You HY, Jin SH (2013). Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000–2010. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4450–4459. [骆成凤, 许长军, 游浩妍, 靳生洪 (2013). 2000–2010年青海湖流域草地退化状况时空分析. 生态学报, 33, 4450–4459.]
- Ma QL, Lu Q, Zhang DK, Liu HJ, Jin HJ (2012). Wind prevention and sand resistance effects of *Artemisia sphaerocephala* and *A. ordosica*. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 1639–1645. [马全林, 卢琦, 张德魁, 刘虎俊, 靳虎甲 (2012). 沙蒿与油蒿灌丛的防风阻沙作用. 生态学报, 31, 1639–1645.]
- Polade SD, Pierce DW, Cayan DR, Gershunov A, Dettinger MD (2014). The key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. *Scientific Reports*, 4, 4364. DOI: 10.1038/srep04364.
- Riah N, Béna G, Djekoun A, Heulin K, de Lajudie P, Laguerre G (2014). Genotypic and symbiotic diversity of Rhizobium populations associated with cultivated lentil and pea in sub-humid and semi-arid regions of Eastern Algeria. *Systematic and Applied Microbiology*, 37, 368–375.
- Schwinning S, Starr BI, Ehleringer JR (2003). Dominant cold desert plants do not partition warm season precipitation by event size. *Oecologia*, 136, 252–260.
- Tomlinson KW, Poorter L, Sterck FJ, Borghetti F, Ward D, Bie S, Langevelde F (2013). Leaf adaptations of evergreen and deciduous trees of semi-arid and humid savannas on three continents. *Journal of Ecology*, 101, 430–440.
- Trenberth KE, Dai A, van der Schrier G, Jones PD, Barichivich J, Briffa KR, Sheffield J (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, 17–22.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, Wu GX, Liu YM (2008). Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophysical Research Letters*, 35, L14702. DOI: 10.1029/2008GL034330.
- Wang Y, Li YH, Sun XY (2015). Impact of climate change on the eco-environment in the Yellow River Source. *Pratacultural Science*, 32, 539–551. [王莺, 李耀辉, 孙旭映 (2015). 气候变化对黄河源区生态环境的影响. 草业科学, 32, 539–551.]
- Wilcox CS, Ferguson JW, Fernandez GC, Nowak RS (2004).

- Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. *Journal of Arid Environments*, 56, 129–148.
- Wu YB, Che RX, Ma S, Deng YC, Zhu MJ, Cui XY (2014). Estimation of root production and turnover in an alpine meadow: Comparison of three measurement methods. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 3529–3537. [吴伊波, 车荣晓, 马双, 邓永翠, 朱敏健, 崔晓勇 (2014). 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究. 生态学报, 34, 3529–3537.]
- Yahdjian L, Sala OE (2010). Size of precipitation pulses controls nitrogen transformation and losses in an arid Patagonian ecosystem. *Ecosystems*, 13, 575–585.
- Yang K, Huang JH, Dong D, Ma WH, He JS (2010). Canopy leaf N and P stoichiometry in grassland communities of Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 17–22. [杨阔, 黄建辉, 董丹, 马文红, 贺金生 (2010). 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析. 植物生态学报, 34, 17–22.]
- Yang YH, Piao SL (2006). Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 1–8. [杨元合, 朴世龙 (2006). 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 30, 1–8.]
- Ye X, Zhou HK, Liu GH, Yao BQ, Zhao XQ (2014). Responses of phenological characteristics of major plants to nutrient and water additions in *Kobresia humilis* alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 147–158. [叶鑫, 周华坤, 刘国华, 姚步青, 赵新全 (2014). 高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应. 植物生态学报, 38, 147–158.]
- You QL, Min JZ, Zhang W, Pepin N, Kang SC (2015). Comparison of multiple datasets with gridded precipitation observations over the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 45, 791–806.
- Zhang XZ, Yang YP, Piao SL, Bao WK, Wang SP, Wang GX, Sun H, Luo TX, Zhang YJ, Shi PL, Liang EY, Shen MG, Wang JS, Gao QZ, Zhang YL, Ouyang H (2015). Ecological change on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 60, 3048–3056. [张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天翔, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张镱锂, 欧阳华 (2015). 青藏高原生态变化. 科学通报, 60, 3048–3056.]
- Zhao GD, Liu SR, Ma QL (2003). Ecophysiological responses of two xerophytes *Atraphaxis frutescens* and *Elaeagnus angustifolia* to the change of groundwater depth in arid area. I. Changes in leaf nutrient, chlorophyll, soluble sugar and starch contents. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 228–234. [赵广东, 刘世荣, 马全林 (2003). 沙木蓼和沙枣对地下水位变化的生理生态响应I. 叶片养分, 叶绿素, 可溶性糖和淀粉的变化. 植物生态学报, 27, 228–234.]
- Zhou XR, Yue LJ, Wang SM (2014). Effect of the N-P-Na recipe on growth of *Zypoghyllum xanthoxylum* under different osmotic stress. *Pratacultural Science*, 31, 1087–1096. [周向睿, 岳利军, 王锁民 (2014). 渗透胁迫下氮磷钠配方对多浆旱生植物霸王生长的影响. 草业科学, 31, 1087–1096.]

责任编辑: 杨允菲 责任编辑: 王 葳



扫码加入读者圈
听语音, 看问答