

# 影响艾比湖流域荒漠植物生物量分布的土壤驱动力分析

张磊<sup>a</sup>, 吕光辉<sup>b, ①</sup>, 蒋腊梅<sup>c</sup>, 王恒方<sup>c</sup>, 蔡艳<sup>a</sup>

(新疆大学: a. 资源与环境科学学院, b. 干旱生态环境研究所, c. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 以艾比湖流域荒漠植物为研究对象, 对荒漠植物的生物量和样地的土壤因子进行了测定和统计学分析, 利用冗余分析和 Monte Carlo 检验探讨了影响荒漠植物地上部和地下部生物量以及总生物量的土壤驱动因子。结果显示: 艾比湖流域荒漠植物地上部和地下部生物量以及总生物量的变异系数均在 70% 以上, 其中, 地下部生物量的变异系数在 100% 以上, 表明研究区荒漠植物生物量空间分布的差异性较强, 尤其是地下部生物量。研究区土壤的含水量和含盐量的均值分别为 2.01% 和 2.47%, 表明研究区土壤水分和盐分含量较低。冗余分析和重要性排序结果显示: 土壤的有机质含量、全氮含量、速效磷含量和 pH 值是影响地上部生物量和总生物量的主要土壤驱动因子, 其中, 土壤的有机质含量、全氮含量和速效磷含量与地上部生物量和总生物量呈极显著正相关, 重要性由大到小依次为土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤速效磷含量、土壤 pH 值。土壤的含水量、有机质含量和 pH 值对地下部生物量影响显著, 其中, 土壤含水量与地下部生物量呈极显著正相关, 重要性由大到小依次为土壤含水量、土壤有机质含量、土壤 pH 值。土壤因子对荒漠植物地上部和地下部生物量的解释量分别为 54.34% 和 32.39%。研究结果表明: 艾比湖流域荒漠植物地上部和地下部生物量的空间分布存在差异性, 土壤的有机质含量、全氮含量、速效磷含量和 pH 值直接影响群落的生产力, 土壤含水量是决定荒漠植物地下部生物量的关键土壤驱动因子。

**关键词:** 艾比湖流域; 荒漠植物; 生物量; 土壤因子; 冗余分析

中图分类号: Q948.113; S718.51+6 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)03-0012-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.02

**Analysis on soil driving force affecting biomass distribution of desert plants in Ebinur Lake basin**  
ZHANG Lei<sup>a</sup>, LYU Guanghui<sup>b, ①</sup>, JIANG Lamei<sup>c</sup>, WANG Hengfang<sup>c</sup>, CAI Yan<sup>a</sup> (Xinjiang University: a. College of Resources and Environment Sciences, b. Institute of Arid Ecology and Environment, c. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(3): 12-18

**Abstract:** Taking desert plants in Ebinur Lake basin as research objects, biomass of desert plants and soil factors of plots were assayed, and their statistical analyses were conducted, and soil driving factors affecting above- and under-ground biomasses and total biomass of desert plants were discussed by using redundancy analysis and Monte Carlo test. The results show that coefficients of variation of above- and under-ground biomasses and total biomass of desert plants in Ebinur Lake basin are all above 70%, in which, that of under-ground biomass is above 100%, indicating that spatial distribution difference of desert plants biomass (especially under-ground biomass) in research area is relatively big. The means of moisture and salinity contents in soil of research area are 2.01% and 2.47%, respectively, indicating that their contents in soil of research area are relatively low. The results of redundancy analysis and importance order show that organic matter content, total nitrogen content, available phosphorus content, and pH value of soil are the major soil driving factors affecting above-ground biomass and total biomass,

收稿日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560131)

作者简介: 张磊(1993—), 男, 新疆克拉玛依人, 硕士研究生, 主要从事生物多样性方面的研究。

①通信作者 E-mail: ler@xju.edu.cn

in which, organic matter content, total nitrogen content, and available phosphorus content in soil show extremely significant positive correlations with above-ground biomass and total biomass, and their importance from big to small is as follows; soil organic matter content, soil total nitrogen content, soil available phosphorus content, soil pH value. Moisture content, organic matter content, and pH value of soil have significant effects on under-ground biomass, in which, soil moisture content shows an extremely significant positive correlation with under-ground biomass, and their importance from big to small is as follows; soil moisture content, soil organic matter content, soil pH value. The interpretation amount of soil factors for above- and under-ground biomasses of desert plants is 54.34% and 32.39%, respectively. It is suggested that there are differences in spatial distribution of above- and under-ground biomasses of desert plants in Ebinur Lake basin, and organic matter content, total nitrogen content, available phosphorus content, and pH value of soil directly affect the productivity of community, and soil moisture content is the key soil driving factor determining the under-ground biomass of desert plants.

**Key words:** Ebinur Lake basin; desert plants; biomass; soil factor; redundancy analysis

干旱区环境资源特殊,植物种类贫乏,空间分布稀疏,生物量小<sup>[1]</sup>。荒漠植物对干旱环境水分条件独特的响应过程决定了荒漠植物多样性的独特性<sup>[2]</sup>。由于干旱区气候恶劣,植被稀疏,物种贫瘠,生境在遭到破坏后很难自行恢复,生态系统脆弱,即所谓的“荒漠化”<sup>[3]</sup>。因此,对于干旱区荒漠生态系统的合理开发与保护非常重要。

土壤作为生态系统中植被主要的养分来源,在植物生长发育以及群落结构和生态系统稳定方面有重要作用<sup>[4]</sup>,土壤肥力直接影响生态系统的功能。初级生产力是受土壤因子影响最直接的生态系统功能指标<sup>[5]</sup>,是生态系统功能的重要表现形式。群落的初级生产力是土壤肥力和物种丰富度的函数,初级生产力水平在一定范围内受土壤因子制约<sup>[6]</sup>。由于在野外开展地下部生物量调查工作的难度大,有关植物生物量的测定大多基于其地上部。An等<sup>[7]</sup>研究发现,土壤盐分制约了荒漠植物叶片的生长,降低了叶片的质量和大小;杨晓霞等<sup>[8]</sup>认为,土壤中添加氮和磷能促进植物生长和地上部生物量增加。上述研究结果表明:土壤环境对植物地上部生物量具有一定程度的影响,但关于植物地下部生物量与土壤因子之间关系的研究甚少。根系作为植物生长过程的重要器官,其生物量积累是植物生长发育的重要保障<sup>[9]</sup>,应充分考虑地下部生物量对土壤因子的响应。

艾比湖湿地国家级自然保护区是典型的温带干旱区荒漠生态系统,生态环境脆弱,加之放牧的影响,导致保护区的植物多样性减少,生态系统功能遭到破坏。目前,关于保护区内土壤因子的研究大多集中在植物多样性方面<sup>[10-11]</sup>,关于生物量特征的研究鲜有报道。为此,作者对该保护区荒漠植物生物量分布特

征的土壤驱动力进行探讨,以期明晰艾比湖流域荒漠植物生物量对土壤环境的响应机制,丰富干旱区土壤资源与生物量关系的理论基础,并为合理利用植物资源及恢复受损的生态系统提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区位于准噶尔盆地西南部的盐碱汇集地。该流域属于典型温带大陆性干旱气候,年蒸发量在1600 mm以上,年降水量约100 mm,年日照时数约2800 h,极端最高气温44℃,极端最低气温-33℃<sup>[12]</sup>。复杂的地形和苛刻的气候条件使流域内形成了独特的荒漠-湿地-戈壁复合景观。经过野外实地调查,选取具有代表性植物和地形的区域设置样地,样地位于东大桥管护站附近阿其克苏河以北荒漠河岸,距离阿其克苏河5 km,地理坐标为北纬44°38'28"~44°39'18"、东经83°33'03"~83°33'11",海拔280~296 m。该区域是典型温带荒漠生态系统,以草本群落和低矮的灌木群落为主,主要植物种类除梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]和胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)外,在平原低地还有铃铛刺[*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss]、新疆绢蒿[*Seriphidium kaschgaricum* (Krasch.) Poljak.]、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、盐爪爪[*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.]、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap.)、小獐毛[*Aeluropus pungens* (M. Bieb.) C. Koch]、罗布麻(*Apocynum venetum* Linn.)、对节刺(*Horaninowia ulicina* Fisch. et Mey.)、盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.]、芦苇

[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]、盐节木 [*Halocnemum strobilaceum* (Pall.) Bieb.]、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum* Turcz.) 和花花柴 [*Karelinia caspia* (Pall.) Less.]等。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及采样方法 样地沿阿其克苏河垂直方向设置,东西相距 200 m,南北相距 1 600 m;然后在样地内设置 3 条平行样带,样带间东西相距 100 m;再在样带内设置面积 1.5 m×1.5 m 的样方,

样方间南北相距 40 m,共计 120 个样方。于 2016 年 7 月至 8 月荒漠植物个体生长成熟时进行采样,调查和记录供试样地的植物种类(表 1)。

采用挖掘法获取样方内植株完整的地上部和地下部,用刷子除去表面的少量泥土后,现场称量其鲜质量。按照“同样方同物种”原则,分别将植物地上部和地下部带回实验室。利用对角线取样法在每个样方采集 3 个 0~30 cm 土层的混合土样,装入铝盒称量,土样风干后带回实验室进行理化分析。

表 1 艾比湖流域供试样地植物种类

Table 1 Species in sampling plots tested in Ebinur Lake basin

序号 No.	种类 Species	科 Family	生活型 Life form	重要值/% Importance value
1	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	藜科 Cenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	59.5
2	花花柴 <i>Karelinia caspia</i>	菊科 Asteraceae	多年生草本 Perennial herb	1.1
3	小獐毛 <i>Aeluropus pungens</i>	禾本科 Poaceae	多年生草本 Perennial herb	3.4
4	乳苣 <i>Mulgedium tataricum</i>	菊科 Asteraceae	多年生草本 Perennial herb	0.1
5	对节刺 <i>Horaninowia ulicina</i>	藜科 Cenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	6.9
6	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	禾本科 Poaceae	多年生草本 Perennial herb	1.0
7	新疆绢蒿 <i>Seriphidium kaschgaricum</i>	菊科 Asteraceae	多年生草本 Perennial herb	13.6
8	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科 Cenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	2.2
9	刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>	藜科 Cenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	1.0
10	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	藜科 Cenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	1.0
11	草甸羊茅 <i>Festuca pratensis</i>	禾本科 Poaceae	多年生草本 Perennial herb	0.1
12	罗布麻 <i>Apocynum venetum</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	灌木 Shrub	1.1
13	骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	豆科 Fabaceae	灌木 Shrub	5.5
14	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	藜科 Cenopodiaceae	灌木 Shrub	1.3
15	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	灌木 Shrub	0.1
16	琵琶柴 <i>Reaumuria soongarica</i>	柽柳科 Tamaricaceae	灌木 Shrub	1.9
17	沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	蓼科 Polygonaceae	灌木 Shrub	0.2

1.2.2 指标测定方法 将带回的植株地上部和地下部用蒸馏水洗净,于 65 °C 烘干 72 h,分别称量干质量。采用烘干法<sup>[13]23-24</sup>测定土壤含水量;采用电导法<sup>[13]183-186</sup>测定土壤电导率,并参照罗毅等<sup>[14]</sup>的方法计算土壤含盐量;采用玻璃电极法<sup>[13]183-186</sup>测定土壤 pH 值;采用凯氏定氮法<sup>[13]45-48</sup>测定土壤全氮含量;采用钼蓝比色法<sup>[13]76-78</sup>测定土壤全磷含量;采用钼锑抗比色法<sup>[13]86-87</sup>测定土壤速效磷含量;采用重铬酸钾法<sup>[13]34-35</sup>测定土壤有机质含量。每个样方 3 次重复。

## 1.3 数据处理

利用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行统计学分析;通过 Canoco 5.0 软件分析荒漠植物生物量与土壤因子的相关关系。通过冗余分析判断荒漠植物生物量对土壤因子的响应程度,在此基础上,通过

Monte Carlo 检验定量评价土壤因子对生物量特征常数变化的显著性,并计算土壤因子的独立解释量。

## 2 结果和分析

### 2.1 艾比湖流域荒漠植物生物量和土壤因子的统计学分析

艾比湖流域荒漠植物生物量和土壤因子的统计结果见表 2。由表 2 可见:艾比湖流域荒漠植物地上部的鲜生物量和干生物量的均值分别为 63.89 和 31.12 g·m<sup>-2</sup>,变异系数分别为 70.04%和 73.98%;地下部的鲜生物量和干生物量的均值分别为 17.87 和 11.11 g·m<sup>-2</sup>,变异系数分别为 119.62%和 106.16%;总鲜生物量和总干生物量的均值分别为 81.76 和 42.23 g·m<sup>-2</sup>,变异系数分别为 73.79%和

76.37%,说明这些生物量相关指标的变异较大。

由表2还可见:艾比湖流域土壤含水量和含盐量的均值分别为2.01%和2.47%,变异系数分别为75.62%和38.46%,说明该地土壤水分和盐分含量整体较低;土壤pH值的均值为pH 7.76,变异系数仅为2.45%,说明该地土壤呈弱碱性;土壤全氮、全磷、速效磷和有机质含量的均值分别为 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $18.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,变异系数

分别为66.67%、10.71%、17.59%和62.20%。

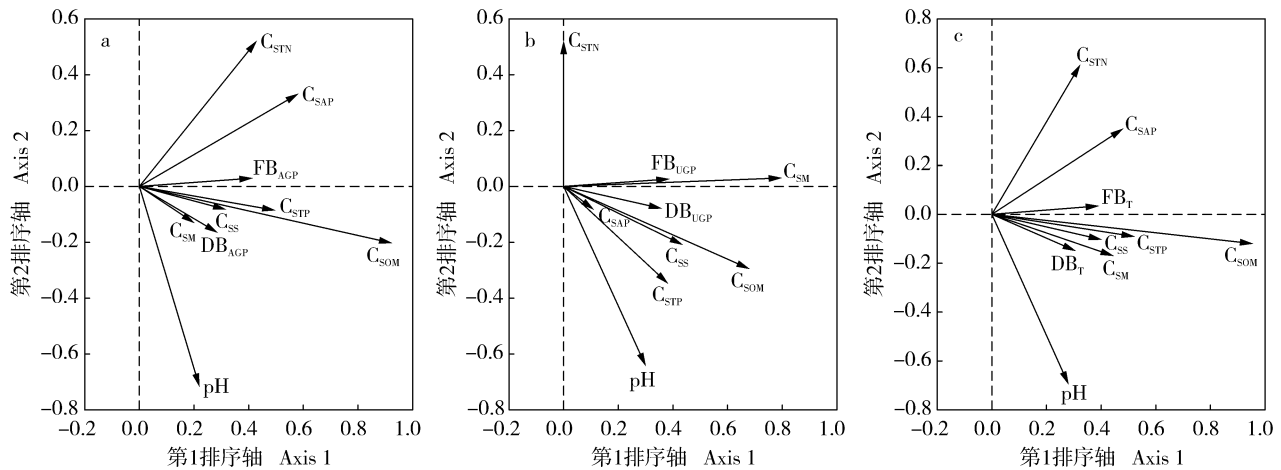
## 2.2 艾比湖流域荒漠植物生物量与土壤因子的冗余分析

通过对艾比湖流域荒漠植物生物量和土壤因子进行冗余分析,得到二维排序图(图1)。艾比湖流域土壤的全氮含量、速效磷含量、有机质含量和pH值对该地荒漠植物地上部鲜生物量和干生物量以及总鲜生物量和总干生物量均有显著影响;影响荒漠植物

表2 艾比湖流域荒漠植物生物量和土壤因子的统计结果

Table 2 Statistical result of biomass of desert plants and soil factors in Ebinur Lake basin

指标 Index	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	变异系数/% Coefficient of variation
地上部鲜生物量 Fresh biomass of above-ground part ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	7.81	280.51	63.89	70.04
地上部干生物量 Dry biomass of above-ground part ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	4.72	123.95	31.12	73.98
地下部鲜生物量 Fresh biomass of under-ground part ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	0.33	110.00	17.87	119.62
地下部干生物量 Dry biomass of under-ground part ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	0.12	53.87	11.11	106.16
总鲜生物量 Total fresh biomass ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	9.79	381.84	81.76	73.79
总干生物量 Total dry biomass ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	5.87	172.08	42.23	76.37
土壤含水量 Soil moisture content (%)	0.44	7.90	2.01	75.62
土壤含盐量 Soil salinity content (%)	0.52	5.49	2.47	38.46
土壤pH值 Soil pH value	7.23	8.39	7.76	2.45
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.02	0.21	0.06	66.67
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.21	0.37	0.28	10.71
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	13.94	34.53	18.25	17.59
土壤有机质含量 Soil organic matter content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.25	5.48	1.64	62.20



$C_{SM}$ : 土壤含水量 Soil moisture content;  $C_{SS}$ : 土壤含盐量 Soil salinity content; pH: 土壤pH值 Soil pH value;  $C_{STN}$ : 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content;  $C_{STP}$ : 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content;  $C_{SAP}$ : 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content;  $C_{SOM}$ : 土壤有机质含量 Soil organic matter content;  $FB_{AGP}$ : 地上部鲜生物量 Fresh biomass of above-ground part;  $DB_{AGP}$ : 地上部干生物量 Dry biomass of above-ground part;  $FB_{UGP}$ : 地下部鲜生物量 Fresh biomass of under-ground part;  $DB_{UGP}$ : 地下部干生物量 Dry biomass of under-ground part;  $FB_T$ : 总鲜生物量 Total fresh biomass;  $DB_T$ : 总干生物量 Total dry biomass.

a: 地上部生物量 Biomass of above-ground part; b: 地下部生物量 Biomass of under-ground part; c: 总生物量 Total biomass.

图1 艾比湖流域荒漠植物生物量与土壤因子的二维排序图

Fig. 1 Two-dimensional ordination diagram of biomass of desert plants with soil factors in Ebinur Lake basin

地下部鲜生物量和干生物量的主要土壤因子包括土壤的含水量、有机质含量和 pH 值,其中,土壤 pH 值与地下部干生物量的相关性最大,且达到显著水平;土壤的含水量和有机质含量与地下部干生物量的相关性也达到显著水平。土壤的全氮含量和速效磷含量均与地上部鲜生物量和总鲜生物量的相关性显著;土壤含水量与地上部干生物量、地下部鲜生物量和总干生物量相关性显著;土壤全氮含量与地下部鲜生物量无显著相关性,却与地下部干生物量呈负相关。除土壤全氮含量外,其他土壤因子与荒漠植物生物量均呈正相关。

对艾比湖流域荒漠植物生物量和土壤因子进行

Monte Carlo 检验,土壤因子对地上部和地下部生物量的解释量分别为 54.34% 和 32.39%。艾比湖流域荒漠植物生物量的土壤因子重要性排序和显著性检验结果(表 3)表明:艾比湖流域土壤的有机质含量、全氮含量、速效磷含量和 pH 值对该地荒漠植物地上部生物量和总生物量的影响较大,且达到显著或极显著水平。土壤的含水量、有机质含量和 pH 值对地下部生物量的影响较大,也达到显著或极显著水平,这 3 个土壤因子所占模型解释量分别为 30.2%、22.7% 和 17.1%,其中土壤含水量与地下部生物量呈极显著正相关,是影响荒漠植物地下部生物量的关键土壤驱动因子。

表 3 艾比湖流域荒漠植物生物量的土壤因子重要性排序和显著性检验结果

Table 3 Results of importance order and significance test of soil factors for biomass of desert plants in Ebinur Lake basin

重要性排序 Importance order	地上部生物量 Above-ground biomass			地下部生物量 Under-ground biomass			总生物量 Total biomass		
	土壤因子 <sup>1)</sup> Soil factor <sup>1)</sup>	A/% <sup>2)</sup>	P	土壤因子 <sup>1)</sup> Soil factor <sup>1)</sup>	A/% <sup>2)</sup>	P	土壤因子 <sup>1)</sup> Soil factor <sup>1)</sup>	A/% <sup>2)</sup>	P
1	C <sub>SOM</sub>	27.8	0.001	C <sub>SM</sub>	30.2	0.007	C <sub>SOM</sub>	28.1	0.001
2	C <sub>STN</sub>	23.2	0.003	C <sub>SOM</sub>	22.7	0.015	C <sub>STN</sub>	21.9	0.005
3	C <sub>SAP</sub>	22.9	0.005	pH	17.1	0.036	C <sub>SAP</sub>	16.5	0.009
4	pH	13.4	0.020	C <sub>STP</sub>	9.9	0.140	pH	15.0	0.015
5	C <sub>STP</sub>	8.3	0.065	C <sub>STN</sub>	9.8	0.153	C <sub>STP</sub>	8.2	0.087
6	C <sub>SS</sub>	3.2	0.346	C <sub>SS</sub>	9.5	0.175	C <sub>SM</sub>	5.7	0.155
7	C <sub>SM</sub>	1.2	0.658	C <sub>SAP</sub>	0.7	0.865	C <sub>SS</sub>	4.7	0.260

<sup>1)</sup> C<sub>SOM</sub>: 土壤有机质含量 Soil organic matter content; C<sub>STN</sub>: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; C<sub>SAP</sub>: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; pH: 土壤 pH 值 Soil pH value; C<sub>STP</sub>: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; C<sub>SS</sub>: 土壤含盐量 Soil salinity content; C<sub>SM</sub>: 土壤含水量 Soil moisture content.

<sup>2)</sup> A: 土壤因子所占模型解释量 The interpretation amount occupied by soil factor in the model.

### 3 讨论和结论

艾比湖流域荒漠植物地上部和地下部生物量以及总生物量存在空间分布不均的特点,这体现了荒漠植物对干旱生境的独特适应性。土壤因子对荒漠植物地上部和地下部生物量以及总生物量的重要性排序及显著性检验结果表明:土壤的有机质含量、全氮含量、速效磷含量、pH 值和含水量对荒漠植物生物量的影响较大。

根系是植物生长发育过程中重要的运输器官<sup>[15]</sup>。冗余分析结果表明:艾比湖流域土壤含水量与该地荒漠植物地下部生物量呈极显著正相关,是决定荒漠植物地下部生物量的关键土壤驱动因子。干旱区内植物对水的需求明显高于其他生境中的植物,

干旱区植物更倾向于将更多的光合产物投入根系,以获取更多的水资源,从而维持自身的生长和繁殖,提高种间竞争能力<sup>[16]</sup>。土壤表层水分状况较好有利于大多数草本植物的生长,植物根系可以充分利用土壤表层水生长,且在土壤水分和养分的复合作用下,根系生物量积累较高<sup>[17]</sup>。植物群落离河岸越远,其土壤含水量越小,植物受到的水分胁迫效应越严重,甚至导致植物生长发育迟缓或停止,植物根系生物量积累明显受阻<sup>[18]</sup>。

在无人类活动的自然生态系统中,植物凋落物、微生物分泌物和动物粪便是土壤有机质的主要来源<sup>[19]</sup>。艾比湖流域荒漠植物主要以草本和小灌木为主,结构单一,植被覆盖率低,地上部生物量低,土壤有机质含量的均值仅为 1.64 g · kg<sup>-1</sup>,远低于全国平均水平(32.3 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>。土壤中 95% 以上的氮素

以及植物所需多种微量元素均存在于有机质中<sup>[21]</sup>。冗余分析结果表明:艾比湖流域土壤有机质含量与该地荒漠植物地上部和地下部生物量均呈显著或极显著正相关,这可能是因为土壤有机质是植物体生长发育所需多种养分的载体。此外,由于艾比湖流域荒漠植物的生物量低且受干扰较少,没有充足的动物粪便和肥料等有机质来源,导致土壤有机质含量偏低,其限制作用更明显。

冗余分析结果表明:艾比湖流域土壤全氮含量对该地荒漠植物地上部生物量的积累具有显著促进作用,这是因为土壤有机质与土壤中氮素的依存关系较高<sup>[22]</sup>。艾比湖流域荒漠植物以草本植物和低矮灌木为主,草本植物具有致密的浅层根系,表层土是植物根系分布的集中层,土壤中有有机质的沉淀加速了土壤中氮素等养分的吸收、运输和循环<sup>[23]</sup>,进而促进植物地上部生物量的增加。已有研究表明:土壤中的氮素是荒漠植物生长的主要限制因子<sup>[24]</sup>,这可能是由于研究区土壤全氮含量整体偏低<sup>[25]</sup>,对土壤生物活性抑制作用不明显。土壤全氮含量与生物量并不是理论上的单峰曲线关系,而是在一个范围内土壤全氮含量越高,群落生产力越大<sup>[26]</sup>,因此,在降水和土壤氮素适宜的条件下荒漠植物才能获得较高生物量。

土壤速效磷能被植被高效吸收和利用,在植物生长发育过程中起到有效的推动作用<sup>[27]</sup>。艾比湖流域典型的土壤为灰漠土、灰棕漠土及风沙土,隐域性土壤以盐土(盐渍化土)为主<sup>[28]</sup>。已有研究表明:土壤中碳酸钙含量越高,颗粒越粗,造成土壤中砂粒含量越高,将土壤中绝大多数磷素固定,速效磷含量整体偏低<sup>[29]</sup>。在中国北方地区的土壤调查中发现,土壤磷含量普遍较低的地域,植物对土壤中磷素的利用效率更强<sup>[30]</sup>,且土壤pH值增加可提高植物对土壤中磷素的利用率<sup>[31]</sup>。本研究区土壤pH值的均值为pH 7.76,促进了荒漠植物对土壤中磷素的吸收,在土壤含水量和土壤有机质的协同作用下共同促进荒漠植物生物量的增加。

在适当范围内土壤pH值偏碱性可以促进植物体根系的伸长以及生物量的积累<sup>[32]</sup>。显著性检验结果表明:艾比湖流域荒漠植物地上部和地下部生物量及总生物量与土壤pH值均呈显著正相关。本研究区土壤pH值范围为pH 7.23至pH 8.39,属碱性土壤,有利于硝化细菌的硝化作用,铵态氮在生成的同时大部分就被氧化为硝态氮<sup>[33]</sup>,从而有利于荒漠植

物对土壤中氮素的吸收利用。同时,本研究区荒漠植物多为耐盐碱植物,可在高盐碱条件下生长,促进其地上部器官肉质化<sup>[34]</sup>,并具有极强的抗盐碱和抗旱能力。

综上所述,通过对艾比湖流域荒漠植物生物量分布特征的土壤驱动力分析得出以下结论:1)艾比湖流域荒漠植物地上部和地下部生物量及总生物量存在空间分布的差异性,荒漠植物地下部生物量空间分布的差异尤其明显;2)土壤的有机质含量、速效磷含量、全氮含量和pH值是荒漠植物地上部生物量的主要土壤驱动因子,对地上部生物量的影响由大到小依次为土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤速效磷含量、土壤pH值;3)土壤的含水量、有机质含量和pH值是荒漠植物地下部生物量的主要土壤驱动因子,其中土壤含水量是决定荒漠植物地下部生物量的关键因子。

#### 参考文献:

- [1] 尹林克. 中国温带荒漠区的植物多样性及其易地保护[J]. 生物多样性, 1997, 5(1): 40-48.
- [2] 袁国富, 张佩, 罗毅. 中国温带荒漠植物蒸腾过程模拟的若干问题分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 47-53.
- [3] 甄霖, 胡云锋, 魏云洁, 等. 典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 63-74.
- [4] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 167-177.
- [5] 王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 等. 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 1-7.
- [6] AARSEN L W. On correlations and causations between productivity and species richness in vegetation: predictions from habitat attributes[J]. Basic and Applied Ecology, 2001, 2(2): 105-114.
- [7] AN P, LI X, ZHENG Y, et al. Distribution of plant species and species-soil relationship in the east central Gurbantunggut Desert, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(1): 101-112.
- [8] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166.
- [9] 李士美, 谢高地, 张彩霞. 典型草地上现存生物量资产动态[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 1-8.
- [10] 何雪芬, 高翔, 吕光辉, 等. 艾比湖湿地自然保护区植物群落多样性对土壤理化因子的响应[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(5): 1018-1024.
- [11] 马玉, 吕光辉, 何学敏, 等. 盐梯度下艾比湖湿地植物多样

- 性响应及土壤因子驱动研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(11): 141-147.
- [12] 杨晓东, 吕光辉, 何学敏, 等. 艾比湖湿地自然保护区4种典型群落间土壤酶活性的变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1278-1285.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 罗毅, 胡顺军, 王兴繁, 等. 一种电导率指标测可溶性盐分含量新方法[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1257-1261.
- [15] DANNOWSKI M, BLOCK A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1/2): 61-76.
- [16] 方昭, 张少康, 刘海威, 等. 黄土丘陵区草本群落生物量空间分布格局及其影响因素[J]. 草业学报, 2018, 27(2): 26-35.
- [17] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学资源环境学院, 2014: 117.
- [18] PERSSON H. Spatial distribution of fine-root growth, mortality and decomposition in a young Scots pine stand in Central Sweden[J]. Oikos, 1980, 34(1): 77-87.
- [19] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-456.
- [20] LI X R, JIA X H, DONG G R. Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64(3): 505-522.
- [21] 王满莲, 孔德鑫, 邹蓉, 等. 不同土壤环境对地枫皮幼苗生长和生物量分配的影响[J]. 作物杂志, 2013, 19(3): 67-71.
- [22] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [23] 杨刚, 谢永宏, 陈心胜, 等. 退田还湖后洞庭湖区土壤颗粒组成和化学特性的变化[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6392-6400.
- [24] 王蒙, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系[J]. 西北植物学报, 2015, 35(2): 379-388.
- [25] 王勇辉. 艾比湖湿地七种植被类型土壤全氮分布特征研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 413-419.
- [26] 刘卉, 郭晓敏, 涂淑萍, 等. 水肥耦合对油茶林地土壤全氮和产量的影响研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 897-902.
- [27] 杜臻杰, 陈效民, 张佳宝, 等. 不同施肥处理下红壤旱地速效磷时空变化及其影响因子[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(4): 112-115.
- [28] 龚雪伟, 吕光辉. 艾比湖流域杜加依林荒漠植物群落多样性及优势种生态位[J]. 生物多样性, 2017, 25(1): 34-45.
- [29] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 76-82.
- [30] ZHOU X, ZHANG Y, JI X, et al. Combined effects of nitrogen deposition and water stress on growth and physiological responses of two annual desert plants in northwestern China[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74(1): 1-8.
- [31] 张玉兰, 陈利军. 沙漠化逆转过程中土壤性状演变综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1440-1450.
- [32] MA Q, YUE L J, ZHANG J L, et al. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* [J]. Tree Physiology, 2012, 32(1): 4-13.
- [33] 杨成龙, 段瑞军, 李瑞梅, 等. 盐生植物海马齿耐盐的生理特性[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4617-4627.
- [34] 赵学春, 来利明, 朱林海, 等. 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 878-889.

(责任编辑: 张明霞)