

DOI: 10.5846/stxb201505291082

张雪妮, 杨晓东, 吕光辉. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境间关系. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Zhang X N, Yang X D, Lü G H. Diversity patterns and response mechanisms of desert plants to the soil environment along soil water and salinity gradients. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境间关系

张雪妮^{1,2}, 杨晓东^{2,3}, 吕光辉^{2,3,*}

1 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

摘要: 植物多样性格局作为生物多样性维持的一个重要方面, 其可揭示群落构建的信息, 反映物种对环境的适应性。结合样带调查和实验分析的方法, 研究新疆艾比湖湿地自然保护区内水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境因子间关系。结果表明: (1) 高、低水盐样地 (SW1, SW2) 土壤容积含水量 (SVWC) 和电导率 (EC) 分别为 16.65% 和 12.02 mS/cm 及 2.63% 和 1.91 mS/cm, 水盐变化主要影响草本和部分灌木群落的植物组成; (2) 高水盐生境下植物群落无明显趋势性分布, 低水盐生境下植物种依水盐和营养元素呈区域性分布。 (3) 高水盐生境下荒漠植物多度呈对数正态模型, 低水盐条件下符合 Zipf 模型, 多度分布的变化反映了群落组成结构的水盐梯度响应; (4) SW1 样地多样性总体显著高于 SW2 样地, 土壤 pH、SVWC 和硫 (S) 对植物多样性有不同程度的极显著影响。综上可知, 荒漠植物分布及多样性格局与土壤环境间关系呈一定的水盐梯度响应规律, 本研究可为该地区植被恢复和土壤盐渍化治理提供科学依据。

关键词: 多度分布; 多样性格局; 水盐梯度; 荒漠植物; 土壤营养含量

Diversity patterns and response mechanisms of desert plants to the soil environment along soil water and salinity gradients

ZHANG Xueni^{1,2}, YANG Xiaodong^{2,3}, LÜ Guanghui^{2,3,*}

1 Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Education Ministry, Urumqi 830046, China

3 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Diversity patterns play an important role in identifying the mechanisms of biodiversity maintenance. The soil of the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve located in the western margin of the Gurbantonggut Desert, in the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, is short in water and rich in salinity. These regional conditions result in plants that have developed high sensitivity and vulnerability characteristics. Thus, the exploration of desert plant diversity patterns and response mechanisms along various soil water and salinity gradients can integrate community-wide information to reveal the mechanisms of plant adaptations in an arid region and provide scientific strategies for reserve management and biodiversity conservation. However, plant diversity patterns and responses to varying gradients of soil water and salinity in the Ebinur Lake remain unclear. In the present study, three transects were first established that were perpendicular to the north bank of the Aqikesu River (one of three rivers in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve). In each of the three transects, 10—12

基金项目: 国家自然科学基金 (31560131); 国家自然科学基金重点基金项目 (41130531); 教育部创新团队项目 (IRT1180)

收稿日期: 2015-05-29; **修订日期:** 2015-10-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ler@xju.edu.cn

plots (total of 32 plots) were set. The geographic data, abundance, richness, and soil volume water content (SVWC) were surveyed and recorded in each plot. The soil samples were then collected and taken to the Key Laboratory of Oasis Ecology of Xinjiang University. All soil samples were air dried, and soil pH (pH), electrical conductivity (EC), soil organic carbon (C), soil total nitrogen (N), soil total phosphorus (P), and soil total sulfur (S) of all samples were measured in the laboratory. Based on these values, abundance models, multiple comparisons, ordination analysis, and the regression method were used to explore plant abundance distributions, plant diversity patterns, and relationships with the soil environment across soil water and salinity gradients. The results showed that: (1) SVWC and EC in high (SW1) and low (SW2) soil water and salinity plots were 16.65% and 12.02 mS/cm; and 2.63% and 1.91 mS/cm, respectively. Species composition of herb and some shrub communities were mainly influenced by the variation in soil water and salinity. (2) The plant distribution pattern showed no significant relationship with soil environmental factors in SW1 plots; whereas in SW2 plots, significant variations were noted with SVWC, EC, and soil nutrient content, which presented a pattern of regional distribution. (3) Plant abundance patterns were fitted using the lognormal (LN) and Zipf models for SW1 and SW2, respectively. Variability in plant abundance patterns indicated the responses of community composition and structure to soil water and salinity in arid desert conditions. (4) Plant diversity in SW1 was significantly higher than that in SW2. To some extent, this diversity was significantly affected by soil pH, SVWC, and S. Overall, the relationships between distribution and diversity patterns, and the soil environment showed some response patterns to soil water and salinity gradients. In addition, the responses of a plant community to the soil environment across soil water and salinity gradients can provide reference points for the control of vegetation restoration and soil salinization under arid desert conditions.

Key Words: abundance distribution; diversity pattern; soil water and salinity gradients; desert plants; soil nutrition content

植物多样性格局及其成因一直以来都是群落生态学研究的重点问题之一^[1-4]。物种多度分布和多样性指数是研究群落多样性问题的基本工具,在某种程度上多度分布反映了物种对有限资源成功竞争的结果,能够阐明一定环境下决定集聚的生物多样性过程^[5],而多样性指数是群落多样性的数量化表征,二者相辅相成,可综合反映群落结构和多样性格局。植物多样性格局的变化是多因素共同作用的过程,其中土壤环境是最直接、重要的因素之一,特别是在遭受旱胁迫、盐胁迫的干旱地区,土壤水分和盐分(水盐)是植物生长的主要制约因素,直接影响植被发生、多样性维持过程和群落演替等^[6-7],决定了该区域植物多样性格局及其土壤环境影响的复杂性和特殊性^[8]。因此,剖析干旱区荒漠植物多样性格局及其土壤环境影响规律,有助于阐明荒漠植物群落多样性过程机制,以及种群与环境相互作用的过程,对揭示干旱区植被资源恢复机理具有重要意义。

近年来,生物多样性锐减吸引了学界对多样性研究的高度关注^[9],关于多样性格局及其影响机制亦积累了丰富成果。植物多样性格局和过程对环境因素的响应机制随着区域间气候、地形或土壤类型等而不同。目前,相关研究针对森林、草原等植被类型^[10],从海拔高度^[11]、纬度^[12]以及尺度^[13]等视角对不同植被类型的多样性格局响应机制展开了广泛分析,不同植被类型的多样性格局对各种梯度的响应不尽相同,未来有必要开展植物多样性格局和形成机制的深入和长期研究^[11]。在干旱区,有关研究主要关注某一群落特征对单一环境梯度的响应,如水分或盐分梯度下植物群落组成^[14-15],丰富度、多样性^[16-17]的变化等,对水分和盐分双因子梯度下荒漠植物多度格局的响应机制尚缺乏深入探讨。干旱区土壤水盐关系密切^[18],其动态直接影响土壤营养循环和生物学特征^[19],进而影响植被结构和特征。因此,有必要对荒漠区水盐梯度下植物多样性格局的响应规律进行剖析,探讨物种在不同水盐梯度下与土壤环境间的作用机制,以期揭示荒漠区植物多样性的变化规律。

新疆艾比湖国家级湿地自然保护区属于典型的干旱荒漠区,位于保护区内的阿其克苏河河岸带土壤水盐

含量较高,并随着离河道距离增大而降低^[20]。另外,已有研究证明在干旱区随着离河道距离增加,植物种类分布和更替表现出一定的响应规律^[21-22]。因此,在艾比湖保护区垂直阿其克苏河方向可开展土壤水盐梯度下荒漠植物多样性格局及影响机制研究,以期通过该研究回答以下科学问题:在自然土壤水盐双梯度下,(1)荒漠植物多样性格局如何响应?(2)土壤环境因子如何作用于植物组成和多样性变化,并最终形成特定水盐梯度下的多样性格局?解答上述问题,有助于了解荒漠植物群落结构沿土壤水盐梯度的变化规律及生物多样性维持机制,为揭示荒漠区植物多样性过程,了解干旱区生物多样性丧失机理^[1]、恢复和管理植被资源、治理和修复土壤盐渍化等提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30'—45°09' N, 82°36'—83°50' E)位于新疆精河县西北、准噶尔盆地西南,是准噶尔盆地西南缘最低洼地和水盐汇集中心。本区为典型大陆性气候,干燥少雨多风,年平均气温5℃。降水量年内分配不均,蒸发强烈,多年平均降水量和蒸发量分别为105.17 mm和1315 mm。艾比湖特殊的湿地生态环境有其独特的生物资源多样性,主要植物种类包括近河岸的胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)、怪柳(*Tamarix ramosissima* Ldb.)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. M.) Bge.)、盐豆木(*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss.)和芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.),湖滨盐沼地的盐穗木(*Halostachys caspica* (M. B.) C. A. M.)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum* (Pall.) M. B.)、碱蓬(*Suaeda glauca* (Bge.) Bge.)和盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.),平原低地还分布有甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、小獐毛(*Aeluropus pungens* (M. B.) C. Koch.),山前冲积洪扇有琵琶柴(*Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim.)等^[23]。该区域分布有灰漠土、灰棕漠土和风沙土等典型地带性土壤,以及盐(盐渍化)土、草甸土和沼泽土等隐域性土壤。因干旱和盐碱作用,保护区土壤盐分高,碱性强,土壤质地较差,浅层(0—10 cm)土壤的平均电导率和pH值分别为5.41 ms/cm和8.77,平均容重约1.38 g/cm³,含水量平均为7.19%^[24]。阿其克苏河位于保护区内湖区东侧,是艾比湖的水源之一,河岸及近处的古河道潜水溢出带分布有大量胡杨、怪柳、梭梭、盐豆木等典型植物,近年来,由于人类活动和气候变化的影响,阿其克苏河几近干涸,河岸植被面临退化威胁。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查、土壤采集与分析

按土壤水盐可能沿离河距离的变化梯度,同时避开河道南岸的农业影响,选择在艾比湖湿地自然保护区阿其克苏河北侧垂直河道方向设置间隔约5 km的三条样带,样带涵盖区域可反映研究区局地尺度的水盐变化。各样带按离河距离增加向北部调查,各样带每隔500 m,设置1个10 m×10 m样方,样带和样方分布见图1,试验中共调查样方32个。调查过程中记录样方位置和海拔,调查指标主要为物种数与个体数。同时,在调查样方内,随机采集5个裸地的0—15 cm土壤约500g,充分混匀后用四分法取土样约500g,同步利用TDR(Field Scout™ TDR 300, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, USA)在取土点附近测定土壤容积含水量;土样采集后置入自封袋,后带回实验室自然风干后用于实验分析。室内分析的土壤指标和方法分别为:土壤pH值用酸度计法测定(PHS-3C,上海仪电科学仪器股份有限公司,上海,中国)、电导率采用电导率仪(DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司,上海,中国)测定、有机碳(SOC)用重铬酸钾容量法、全氮(TN)用凯氏定氮法、全磷(TP)用HClO₄-H₂SO₄消解-钼锑抗比浊法,全硫(TS)用Mg(NO₃)₂氧化-BaSO₄比浊法,各指标测定方法参考文献^[25]。

1.2.2 数据分析

土壤水分和盐分梯度划分通过聚类分析确定,在比较不同土壤水盐梯度下土壤各指标差异的基础上,分别分析各水盐梯度下植物种的多度分布、多样性变化,最后利用排序方法和逐步回归法分别分析物种和多样

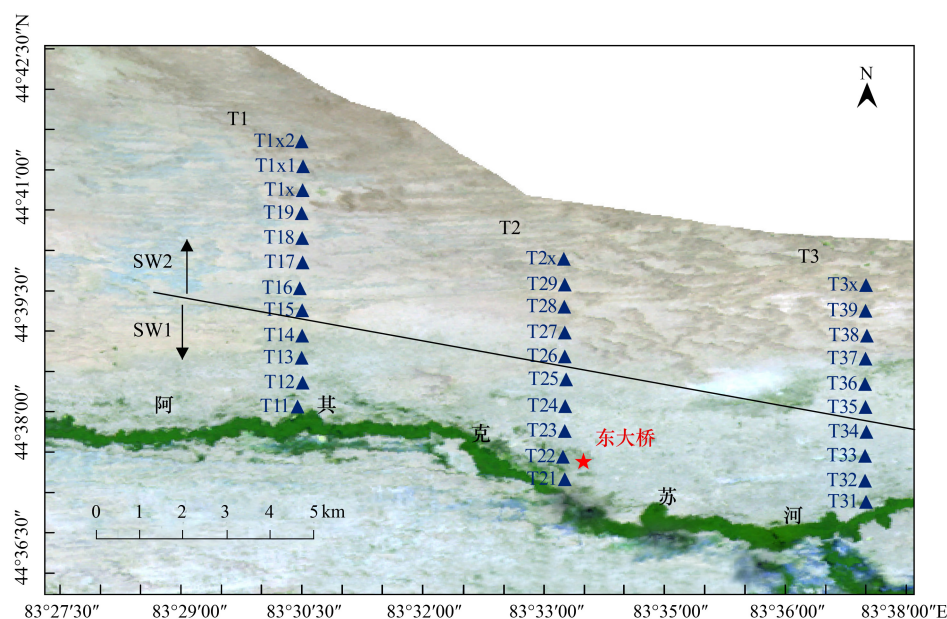


图1 调查样地和采样点示意图

Fig.1 Investigating plots and sampling sites

性指数与土壤因素间关系。上述聚类分析(类平均法)、方差分析(GLM, Duncan 法多重比较)和逐步回归分析在 SAS 8.0 中完成;排序法首先用 DCA 分析选择排序方法,当排序轴梯度长度(Lengths of gradient, LGA)大于 4 时适合非线性模型,当 LGA 小于 3 时适合线性模型, LGA 介于 3 和 4 之间时两种模型均适合^[26]。SW1 和 SW2 样地的物种 DCA 第一排序轴长度分别为 4.765(>4) 和 2.73(<3), 因此分别采用 CCA(单峰模型)和 RDA(线性模型)分析两样地物种与土壤因子间关系,多样性指数的 DCA 分析显示 LGA 均小于 3, 因此采用 RDA 分析其与土壤环境间关系,所有排序分析在 CANOCO 4.5 中完成。植物多度分布拟合及 α 多样性计算利用 R 语言的 vegan 包完成,多样性指数的具体计算过程如下:

$$\text{物种丰富度指数} \quad SP = S \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$\text{Pielou 指数} \quad J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

$$\text{Simpson 指数} \quad D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

$$\text{Fisher-}\alpha \text{ 指数} \quad \alpha = \ln \left(1 + \frac{N}{\alpha} \right) / S \quad (5)$$

以上各式中, S 为样方中的物种数, P_i 为第 i 个种的多度占总多度的比例, N 为总多度。

2 结果与分析

2.1 水盐梯度下植物组成和土壤因子差异

32 个样方划分至近河岸的高水盐样地(SW1)和距河岸 2 km 以上的低水盐样地(SW2)(图 1, 表 1);两样地共记录植物 26 种, 分属 11 科 20 属, SW1 和 SW2 样地均出现 20 种植物, 共有种 14 种(表 2), 不同样地的植物生活型组成存在差异(表 1), 其中 SW1 样地灌木比例较高(12 种), SW2 样地灌木和草本比例相当(8、9 种);与植物组成差异对应, SW1 样地的土壤酸碱度(pH)、电导率(EC)和容积含水量(SVWC)均极显著高于 SW2 样地($P < 0.01$)(表 1), 反映了近河岸区域较好的土壤水分条件和较强的盐分胁迫;两样地土壤营养元素除全 P 外均有显著差异。

表 1 两样地植物组成和土壤属性特征(均值±标准差)

Table 1 Plant composition and soil properties of two type plots (mean ± stand deviation)

样地 Plots	乔,灌,草物种数量 Number of Tree, Shrub, Grass species	pH	电导率 Electrical conductivity /(mS/cm)	容积含水量 Soil volume water content/%
SW1(<i>n</i> = 13)	3, 12, 5	8.64 ^a ±0.38	12.02 ^a ±4.93	16.65 ^a ±2.89
SW2(<i>n</i> = 19)	3, 8, 9	8.04 ^b ±0.36	1.91 ^b ±1.25	2.63 ^b ±2.32
样地 Plots	有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全硫 Total sulfur/(g/kg)
SW1(<i>n</i> = 13)	4.45 ^a ±2.29	0.46 ^a ±0.18	0.46 ^a ±0.26	42.22 ^a ±11.34
SW2(<i>n</i> = 19)	1.19 ^b ±0.96	0.17 ^b ±0.10	0.40 ^a ±0.16	11.34 ^b ±12.28

同一指标数据的不同字母表示差异极显著,显著性水平 *P*<0.01

表 2 各水盐梯度样地的植物种名录

Table 2 List of plant species in each type plots

序号 Id	植物种名 Plant Species name	科属 Family and genera	所属样地 Plot belongs to	序号 Id	植物种名 Plant Species name	科属 Family and genera	所属样地 Plot belongs to
1	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	藜科 梭梭属	+	14	盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	藜科 盐节木属	+
2	胡杨 <i>Populus euphratica</i>	杨柳 科杨属	+	15	甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	蝶形花科 甘草属	SW1
3	骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	豆科 骆驼刺属	+	16	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	藜科 盐穗木属	SW1
4	白刺 <i>Nitraria schoberi</i>	蒺藜科 白刺属	+	17	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	藜科 碱蓬属	SW1
5	琵琶柴 <i>Reaumuria soongorica</i>	柽柳科 琵琶柴属	+	18	平卧碱蓬 <i>Suaeda prostrate</i>	藜科 碱蓬属	SW1
6	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科 猪毛菜属	+	19	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	茄科 枸杞属	SW1
7	木碱蓬 <i>Suaeda dendroides</i>	藜科 碱蓬属	+	20	小叶碱蓬 <i>Suaeda microphylla</i>	藜科 碱蓬属	SW1
8	罗布麻 <i>Apocynum venetum</i>	夹竹桃科 罗布麻属	+	21	刺沙蓬 <i>Salsda ruthenica</i>	藜科 猪毛菜属	SW2
9	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	禾本科 芦苇属	+	22	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	藜科 猪毛菜属	SW2
10	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	藜科 盐爪爪属	+	23	沙拐枣 <i>Calligonum ebinuricum</i>	藜科 沙拐枣属	SW2
11	花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	菊科 花花柴属	+	24	对节刺 <i>Horaninowia ulicina</i>	藜科 对节刺属	SW2
12	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	柽柳科 柽柳属	+	25	露果猪毛菜 <i>Salsola aperta</i>	碱蓬科 猪毛菜属	SW2
13	盐豆木 <i>Halimodendron halodendron</i>	豆科 盐豆木属	+	26	绢蒿 <i>Serphidium santolinum</i>	菊科 绢蒿属	SW2

所属样地列中“+”号表示该物种在两个样地均出现。

2.2 不同水盐梯度下的物种多度格局与多样性差异

根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)越小拟合越佳的准则,SW1 样地植物多度符合对数正态分布(生物统计模型),富集种和稀有种分别 3—4 种,大多数种多度适中,反映了多数物种对高水盐生境的普遍适应性;SW2 样地服从 Zipf 模型(生态位模型)分布,说明物种先后进入该生境的条件不同,后进入生境的物种需要付出较高代价才能侵入^[27],可能属于逆境生存能力较强的种类;上述植物多度格局对不同水盐梯度的响应反映了植物多样性过程中的物种组成调整机制。

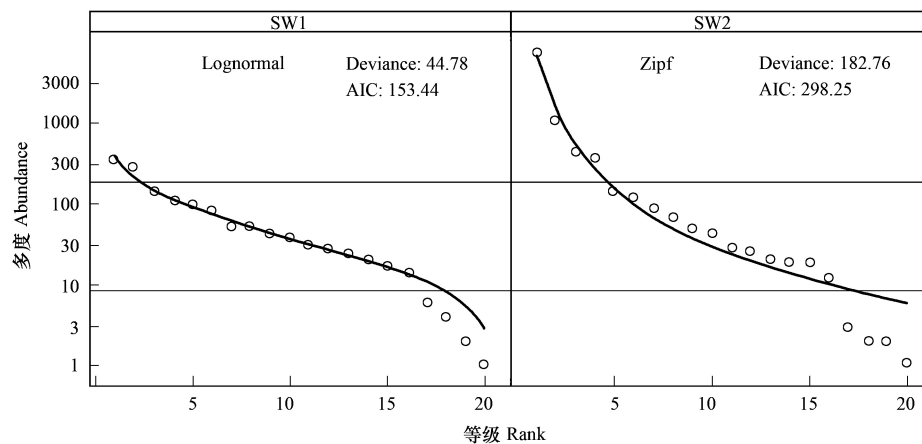


图2 SW1与SW2样地物种多度拟合曲线

Fig.2 Plant abundance fitting curve of SW1 and SW2 plot

两样地物种多样性差异总体显著($P < 0.05$)。除 Shannon-Wiener 指数外,SW1 样地多样性和均匀度均显著高于 SW2 样地($P < 0.05$);由于 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数对常见种敏感,侧重群落优势度,Fisher- α 参数对稀疏种敏感,侧重物种多度^[28],因此上述差异反映出两样地常见种的优势度差异较小,而稀疏种的多度差异较大,这与两样地物种等级为 5—15 及两端时的多度特征相符,说明两类样地的多样性动态可能主要由各生境内的优势种和稀疏种主导。

2.3 水盐梯度下物种及多样性与土壤环境因子间关系

SW1 样地 CCA 分析显示,第一、二轴特征值分别达到 0.89 和 0.44,各排序轴上物种与土壤因子间相关性较高(>0.83),前两轴对物种-环境关系的累计方差贡献率达到 62.5%;SW2 样地 RDA 排序的前两轴特征值分别为 0.62 和 0.05,物种与土壤环境间相关性达到 0.73 以上,第一、二排序轴对物种-环境间关系的累计方差贡献率达到 94.7%以上(表 3)。上述说明土壤环境变量与物种间关系密切,土壤因素能够充分解释植物群落结构的变化。

SW1 样地第一、二排序轴分别与土壤 S、pH、SVWC

和 P、C 和 N 的间有相对小的夹角,说明第一、二轴分别代表土壤酸碱度和水分以及土壤元素的变化梯度。植物种多集中于排序图中心,即高水盐生境下植物种普遍分布于土壤水盐和营养含量较低的区域;从物种水平看,盐地碱蓬(*Suaeda salsa* (L.) Pall.)、盐豆木、芦苇和琵琶柴等与土壤 C、N、P 营养间正相关,小叶碱蓬(*Suaeda microphylla* Pall.)和甘草与 C、P 营养间,以及盐爪爪、盐节木和猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)与土壤水盐和营养间均为负相关(图 4 左)。SW2 样地土壤 SVWC 与第一轴呈正相关,土壤 C、P、N 和 pH 与第二轴正相关,第一、二轴分别反映土壤水分和营养的变化。盐爪爪、盐节木、白刺(*Nitraria schoberi* L.)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* (B. Keller et Shap.) Shap)和琵琶柴等分布于土壤水盐和 C、P 营养较高的区域;沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica* Iljin.)、芦苇、花花柴(*Karelinia caspica* (Pall.) Less.)和盐豆木等分布于水盐偏低、营养适中但低 S 的土壤上;胡杨、猪毛菜等生长于土壤水盐和 C、P 略低的生境;而木碱蓬(*Suaeda dendroides* (C. A. M.) Moq.)、沙拐枣(*Calligonum ebinuricum* Ivanova.)、对节刺(*Horaninowia ulicina* Fisch. et Mey.)、露果猪毛菜(*Salsola aperta* Pauls.)、梭梭和绢蒿(*Seriphidium santolinum* (Schrenk) Poljak.)等则分布于土壤水盐和营养均较低的区域(图 4 右)。

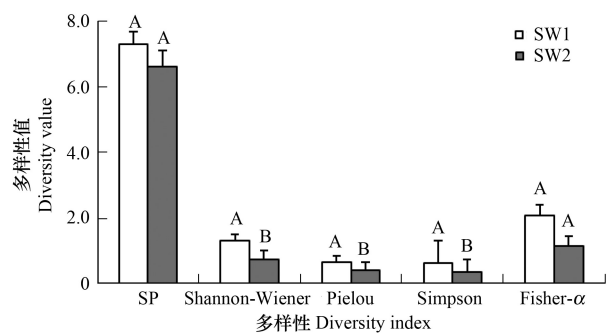


图3 SW1与SW2样地植物多样性差异

Fig.3 Difference of plant diversity between SW1 and SW2 plots

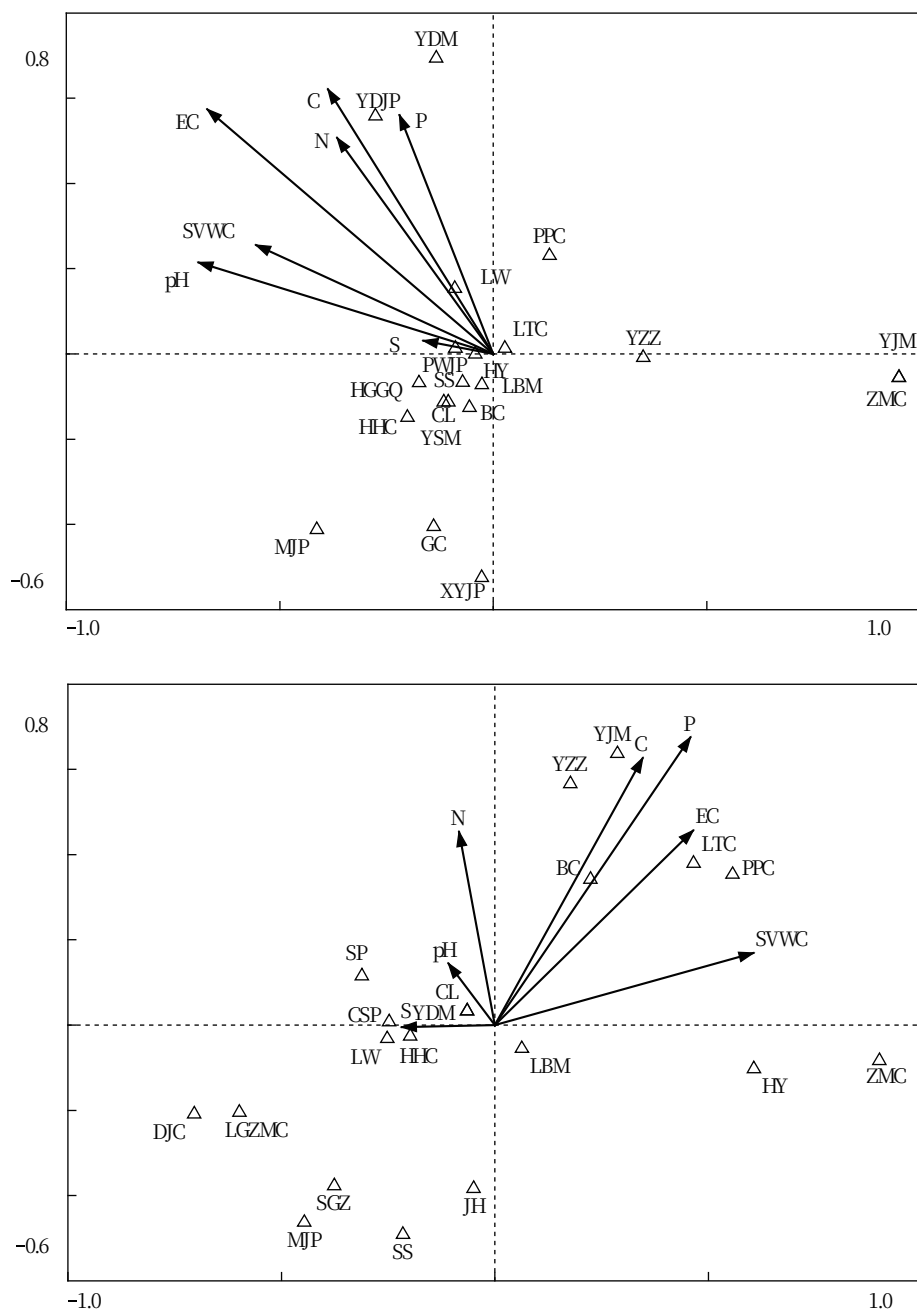


图 4 SW1 和 SW2 样地物种与土壤因子的 CCA 分析(左)和 RDA 分析(右)

Fig.4 Ordination analysis on plant species and soil factors of SW1 (CCA, left) and SW2 (RDA, right)

YDM:盐豆木; YDJP:盐地碱蓬; PPC:琵琶柴; LW:芦苇; LTC:骆驼刺; YZZ:盐爪爪; YJM:盐节木; ZMC:猪毛菜; PWJP:平卧碱蓬; HGGQ:黑果枸杞; SS:梭梭; HY:胡杨; LBM:罗布麻; HHC:花花柴; YSM:盐穗木; BC:白刺; MJP:木碱蓬; GC:甘草; XYJP:小叶碱蓬; SP:沙蓬; CSP:刺沙蓬; CL:怪柳; DJC:对节刺; LGZMC:露果猪毛菜; SGZ:沙拐枣; JH:绢蒿

表 3 SW1 样地 CCA 和 SW2 样地 RDA 分析的统计信息

Table 3 Statistics value of CCA analysis on SW1 plot and RDA analysis on SW2 plot

项目 Item	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第一轴 F 检验 Axis 1 F test
SW1 特征值 Eigenvalues	0.89	0.44	$F = 1.785$ $P = 0.01$
CCA 物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.98	0.95	

续表

项目 Item		第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第一轴 F 检验 Axis 1 F test
物种-环境关系的累计方差贡献率 Cumulative percentage variance of species-environment relation		41.7	62.5	
SW2	特征值 Eigenvalues	0.62	0.05	$F = 18.02 \quad P = 0.01$
RDA	物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.89	0.73	
物种-环境关系的累计方差贡献率 Cumulative percentage variance of species-environment relation		87.9	94.7	

从多样性指数来看,土壤 pH 对高、低水盐生境下的植物多样性动态均有极显著影响,特别是对样地内种丰富度变化的调控作用显著;土壤 SVWC 和 S 营养仅在水盐较低生境下对植物多样性的变化有微弱的极显著影响;土壤 EC 及其他营养元素对研究区植物多样性的变化未表现出显著影响(表 4)。

表 4 物种多样性指标与土壤因素间的逐步回归

Table 4 Stepwise regression analysis of plant diversity and soil factors

指标 Item	土壤 pH pH	土壤容积含水量 Soil volume water content / %	土壤全硫 Total sulfur/ (g/kg)	回归系数 Regression coefficient
丰富度指数 SP	0.85 ** / 0.67 **	— / —	— / 0.11 **	0.97 / 0.97
香农威纳指数 Shannon-Wiener	0.15 ** / 0.10 **	— / -0.15 **	— / 0.03 **	0.94 / 0.86
皮洛指数 Pielou	— / 0.06 **	0.04 ** / -0.08 **	— / 0.01 **	0.94 / 0.86
辛普森指数 Simpson	0.07 ** / 0.05 **	— / -0.08 **	— / 0.01 **	0.94 / 0.84
费歇尔指数 Fisher-α	0.24 ** / 0.11 **	— / —	— / 0.02 **	0.90 / 0.95

“/” 前后分别表示 SW1 和 SW2 生境下的指标系数, * * 表示该指标在回归模型中极显著 $P < 0.01$

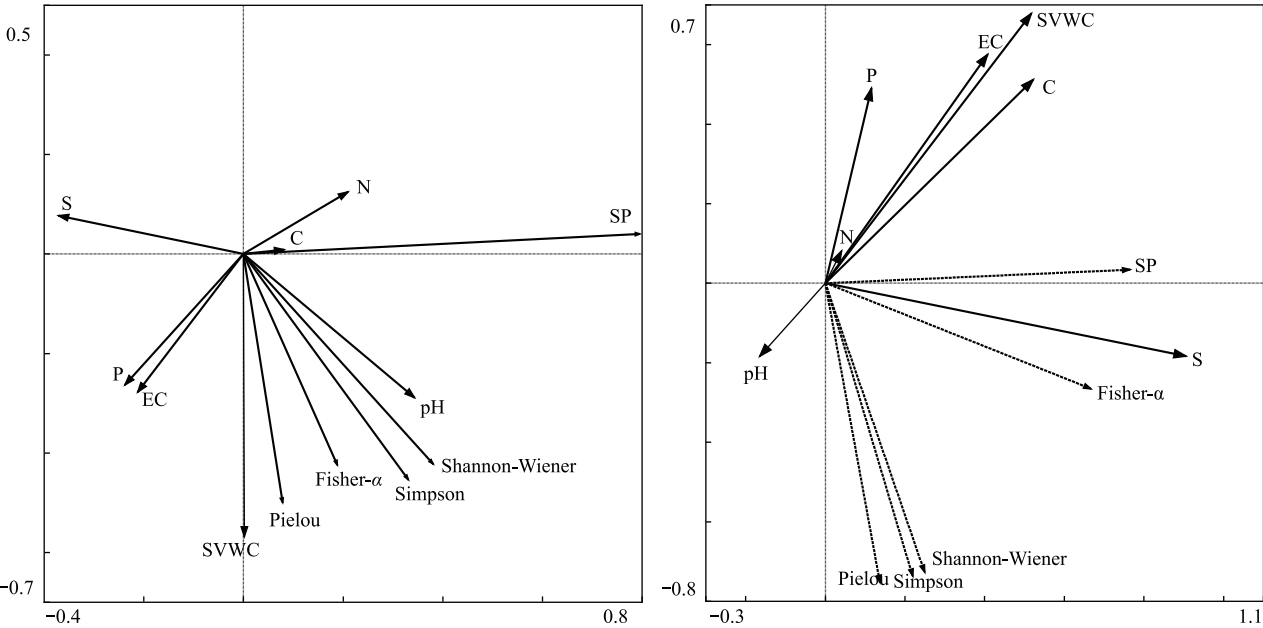


图 5 SW1(左)和SW2(右)样地物种多样性指数与土壤因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis on plant species indices and soil factors of SW1 (left) and SW2 (right)

多样性指数与土壤因子间的 RDA 分析显示(图 5),SW1 样地植物多样性指数与土壤 pH 和 SVWC 间多为正相关(除 SP 与 SVWC 外),物种丰富度 SP 与土壤 S、P、EC 间负相关,与土壤 C、N 间正相关;沿 RDA 第一排序轴从左到右,随着土壤 S 的降低和 C、N 的增加,物种丰富度增加;沿 RDA 第二排序轴从下到上,随着土

壤 pH、SVWC 含量的降低,多样性指数逐渐降低;综合来看,土壤 pH 和 SVWC 是影响 SW1 样地植物多样性变化的主要正向因子,抑制多样性增加的主要因子为土壤 S。SW2 样地植物多样性指数与土壤 S 间正相关,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数与土壤 pH 间正相关;沿 RDA 第一排序轴从左至右,随着土壤 S 含量增加,多样性指数逐渐增大;沿 RDA 第二排序轴,从上至下随着 pH 的降低和土壤 SVWC、EC、C、P 等的增加,多样性指数下降;总体看来,土壤 S、pH 和 SVWC 是影响 SW2 样地多样性的决定性因子。

3 结论与讨论

3.1 荒漠植物多样性格局特征的水盐梯度响应

物种多度分布模型的变化预示着生态学过程的转变^[1]。研究区植物多度分布模型在高、低土壤水盐梯度间由对数正态分布模型转变为 Zipf 模型的变化说明,群落的组成结构对不同水盐条件产生响应。高水盐梯度下,物种多度呈对数正态分布模型表明,植物种丰度和多度结构可能受多种因素随机变化的影响^[5],即在水分和盐分相对较高的生境,其他土壤因素对植物分布的决定作用同样不容忽视。低水盐梯度下物种多度分布符合 Zipf 模型,反映环境中多种因素的影响是依次作用于物种的,后来种的生存需求更多,因此比最初到达的种要少^[5]。对于研究区的低水盐梯度,可以推测随着生境条件的愈加恶劣,植物间对资源的竞争逐渐凸显,具有不同生态位宽度的种规模产生分异,进而形成低水盐梯度下多度符合 Zipf 模型分布。从具体的多度和丰度变化来看,两样地多度较高(SW1>100, SW2>360)的植物种主要为草本,而部分草本以及灌木和乔木的多度较低(SW1&SW2<10)。同时,两样地总丰富度相等,但不同水盐梯度下灌木和草本植物丰富度的变化较大。

对于植物多样性,通常在一定范围内,其随着水分增加或盐分降低而提高^[7,16],但研究区高水盐生境下的植物多样性指数显著高于低水盐生境。这可能与植物对干旱和盐分胁迫的生态适应性有关。高水盐生境下,主要分布耐盐灌木或草本植物(如盐地碱蓬、小叶碱蓬、甘草、盐穗木等),而在土壤水分极度限制的低水盐生境下,仅分布有少量的耐旱草本或灌木(刺沙蓬、对节刺、沙拐枣、沙蓬等)。因此,旱胁迫加剧可能是导致两种生境下植物多样性指数差异显著的主要原因。

上述说明,土壤水盐及其他土壤因子对群落结构的影响主要通过草本植物及其多度调整来实现,研究区草本植物对浅层土水盐变化的敏感性较高,可在一定程度上指示土壤水盐梯度,为荒漠植被恢复和土壤盐渍化治理提供参考。在低水盐生境下,干旱胁迫是导致植物多样性显著降低的主要原因。

3.2 荒漠植物多样性格局与土壤因子间的关系

不同水盐梯度下物种组成与土壤因子间关系的变化反映了群落结构的调整及其对生境变化的适应策略。在高水盐梯度下,仅在该样地分布的植物整体随着土壤 S 和 pH、SVWC 和 EC 的提高而增加,仅在 SW2 样地分布的物种则整体随着土壤因素的降低而增加,而对于两样地均出现的物种,其与土壤 C、P、EC、SVWC 的关系则在 SW2 样地更为密切。上述说明,群落通过耐盐或耐旱种的特殊分布来调整其结构,进而维持不同生境下群落的延续。同时,随着水盐的降低,SW2 样地物种受土壤水分的限制更为突出。

研究区土壤 C、N、P 对不同水盐梯度下的植物多样性动态均未表现出显著影响,但土壤 S 元素在低水盐生境下对植物多样性动态的影响达到极显著水平。虽然在前人的研究中,有结论认为土壤营养对生物多样性没有影响^[29],然而,艾比湖保护区位于典型的荒漠区,土壤贫瘠干旱,营养循环缓慢,利用率低^[30],植物生长和分布普遍遭受 N、P 营养的限制^[31],N、P 对植物多样性无显著影响说明,一方面,干旱可能影响植物吸收 P 的能力^[30],并且 N 限制随着 P 限制而加剧^[32],研究区植物承受的干旱胁迫影响可能大于 N、P 限制的效应。另一方面,在植物演替的稳定时期,其对氮和磷的需求较低^[30],研究区植物群落组成相对稳定(共有种 14 种),这一时期植物对氮、磷的需求也可能稳定在较低水平。S 对研究区植物多样性的显著影响可能是由于其在植物的生长调节、解毒、防卫和抗逆等过程中起重要作用^[33];干旱区含盐分、石膏和石灰较高的荒漠土壤 S 含量亦较高^[34],有研究表明钙质土施 S 可显著提高土壤中 P 的有效性,同时 S 还可以促进 N 的利用效率^[35]。

因此,土壤 S 对提高研究区植物多样性可能具有一定的关键作用,特别是在低水盐生境下土壤 S 与部分特有植物关系紧密,说明土壤 S 对某些荒漠耐旱植物种的生长影响较大,其作用应在荒漠区生物多样性保护中予以重视。

参考文献 (References):

- [1] 马克明. 物种多度格局研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(3): 412-426.
- [2] 韩大勇, 杨允菲. 松嫩草地植物群落物种多度-分布关系及其解释. 生物多样性, 2014, 22(3): 348-357.
- [3] Lefcheck J S, Byrnes J E, Isbell F, Gamfeldt L, Griffin J N, Eisenhauer N, Hensel M J S, Hector A, Cardinale B J, Duffy J E. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nature Communications*, 2015, 6: Article number: 6936.
- [4] 李旭华, 邓永利, 张峰, 董刚, 李世广. 山西庞泉沟自然保护区森林群落物种多样性. 生态学报, 2013, 32(7): 1667-1673.
- [5] Magurran A E. 生物多样性测量. 张峰, 译. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应. 地球科学进展, 2008, 23(7): 685-691.
- [7] 王水献, 董新光, 刘磊. 新疆焉耆盆地绿洲水盐双梯度下天然植被多样性分异特征. 冰川冻土, 2010, 32(5): 999-1006.
- [8] 杜泉滢, 李智, 刘书润, 刘鸿雁. 干旱、半干旱区湖泊周围盐生植物群落的多样性格局及特点. 生物多样性, 2007, 15(3): 271-281.
- [9] Hautier Y, Tilman D, Isbell F, Seabloom E W, Borer E T, Reich P B. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. *Science*, 2015, 348(6232): 336-340.
- [10] 夏富才, 潘春芳, 赵秀海, 何海燕, 周海城. 长白山原始阔叶红松林林下草本植物多样性格局及其影响因素. 西北植物学报, 2012, 32(2): 370-376.
- [11] Sproull G J, Quigley M F, Sher A, González E. Long-term changes in composition, diversity and distribution patterns in four herbaceous plant communities along an elevational gradient. *Journal of Vegetation Science*, 2015, 26(3): 552-563.
- [12] Visser V, Clayton W D, Simpson D A, Freckleton R P, Osborne C P. Mechanisms driving an unusual latitudinal diversity gradient for grasses. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(1): 61-75.
- [13] 要伊桐, 元正龙, 魏彦波, 赵秀海. 长白山次生杨桦林树种多样性格局多尺度分析. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 86-92.
- [14] Naz N, Hameed M, Ahmad M S A, Ashraf M, Arshad M. Is soil salinity one of the major determinants of community structure under arid environments? *Community Ecology*, 2010, 11(1): 84-90.
- [15] Naz N, Hameed M, Nawaz T, Ahmad M S A, Ashraf M. Soil-plant relationships in the arid saline desert of Cholistan. *Arid Land Research and Management*, 2013, 27(2): 140-152.
- [16] 张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 贡璐, 秦璐, 何学敏, 刘昊奇. 基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间连接响应. 生态学报, 2013, 33(18): 5714-5722.
- [17] 靳朝, 雷霆. 水分梯度下洞庭湖洲滩植物群落多样性特征. 湿地科学, 2015, 13(2): 177-183.
- [18] 王雪梅, 柴仲平, 塔西甫拉提·特依拜, 龚爱谨, 程红梅. 干旱区土壤盐渍化及其影响因子分析—以渭干河-库车河三角洲绿洲为例. 土壤, 2009, 41(3): 477-482.
- [19] 徐万里, 刘骅, 张云舒. 新疆盐渍化土壤氮素矿化和硝化作用特征. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 141-145.
- [20] 张雪妮, 吕光辉, 王庭权, 马玉, 阿布里孜·阿不都热合曼, 赵晓英, 郭振洁, 朱修逸. 荒漠区垂直河岸带植物多样性格局及其成因. 生态学报, 2015, 35(18): 5966-5974.
- [21] 陈亚宁, 张宏锋, 李卫红, 陈亚鹏. 新疆塔里木河下游物种多样性变化与地下水位的关系. 地球科学进展, 2005, 20(2): 158-165.
- [22] 刘加珍, 李卫红, 吴纯渊, 陈永金. 荒漠河岸生态系统退化与物种多样性恢复研究. 干旱区研究, 2009, 26(2): 212-220.
- [23] 杨晓东, 吕光辉, 田幼华, 杨军, 张雪梅. 新疆艾比湖湿地自然保护区植物的生态分组. 生态学报, 2009, 28(12): 2489-2494.
- [24] 张雪妮. 荒漠植物群落演替及其营养元素驱动研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [25] 南京农业大学. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1988.
- [26] Lepš J, Šmilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 50-51.
- [27] 彭少麟, 殷祚云, 任海, 郭勤峰. 多物种集合的种-多度关系模型研究进展. 生态学报, 2003, 23(8): 1590-1605.
- [28] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [29] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [30] 郭畏, 何兴东, 张宁, 王海涛, 马迪. 油蒿群落演替中的植物密度对土壤氮/磷比的响应. 土壤学报, 2009, 46(3): 472-479.
- [31] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [32] Marleau J N, Jin Y, Bishop J G, Fagan W F, Lewis M A. A stoichiometric model of early plant primary succession. *The American Naturalist*, 2011, 177(2): 233-245.
- [33] 谢瑞芝, 董树亭, 胡昌浩. 植物硫素营养研究进展. 中国农学通报, 2002, 18(2): 65-69.
- [34] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 1-39.
- [35] Legay N, Personeni E, Slezacek-Deschaumes S, Piutti S, Cliquet J B. Grassland species show similar strategies for sulphur and nitrogen acquisition. *Plant and Soil*, 2014, 375(1/2): 113-126.