

土壤水盐因子对盐湖防护林体系植被群落分布的影响

冯亚亚¹, 汪季^{1,2}, 党晓宏^{1,2}, 魏亚娟¹, 管雪薇¹, 李镯¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古杭锦荒漠生态定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘要: [目的] 以内蒙古自治区吉兰泰盐湖防风固沙林体系为研究对象, 探讨土壤水盐因子对盐湖防护林体系植被群落分布的影响, 为该盐湖防护林抚育和管理提供理论依据。[方法] 应用数量分类和排序方法, 探讨土壤水盐因子对吉兰泰盐湖防护林体系植被群落分布特征的影响。[结果] 双向指示种分析将防护林体系共 8 科 16 属 16 种植物划分为 6 群落类型, 其中, 以白刺为优势种的植被群落土壤水盐含量与其他群落类型均存在显著差异, 不同群落类型下土壤 pH 值差异并不显著 ($p > 0.05$); 双向指示种分类结果很好地反映了植物种及植物群落类型与土壤水盐因子的关系, 并在 CCA 排序图上得到较好的验证。除群落 I 外, 群落 VI, V, IV, III, II 沿土壤水盐含量降低的方向依次分布, 且人工植被群落分布较为集中, 表明人工植被配置对防护林植被分布具有一定的影响。环境因子显著性检验结果表明, Na^+ 、 Mg^{2+} 和土壤含水量对防护林体系植被群落分布影响达到显著水平。[结论] 就土壤水盐因子而言, 土壤 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和土壤含水量是影响防护林体系植物群落分布的主要因素。

关键词: 植物群落; 土壤含水量; 土壤水溶性盐; 吉兰泰盐湖; 防护林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0043-08

中图分类号: S714, S153

文献参数: 冯亚亚, 汪季, 党晓宏, 等. 土壤水盐因子对盐湖防护林体系植被群落分布的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 43-50. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.006; Feng Yaya, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Effects of soil water and salt factors on vegetation community distribution in a salt lake shelterbelt system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 43-50.

Effects of Soil Water and Salt Factors on Vegetation Community Distribution in a Salt Lake Shelterbelt System

Feng Yaya¹, Wang Ji^{1,2}, Dang Xiaohong^{1,2}, Wei Yajuan¹, Guan Xuewei¹, Li Zhuo¹

(1. College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Hangjin Desert Ecological Positioning Observation and Research Station, Ordos, Inner Mongolia 017400, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil water and salt factors on the distribution of vegetation communities in the shelterbelt system of Jilantai Salt Lake were investigated, in order to provide theoretical basis for the maintenance and management of the shelterbelt in the salt lake. [Methods] The influences of soil water and salt factors on the distribution characteristics of vegetation community in Jilantai Salt Lake shelter forest system were studied by using quantitative classification and ordination method. [Results] There were significant differences in soil water and salt content between *Nitraria tangutorum* community and other community types, and there was no significant difference in soil pH value between different community types ($p > 0.05$). The results of TWINSpan showed that the relationship between plant species and plant community type was very good. The relationship between soil water and salt content was well verified in CCA ordination chart. Except for community I, community VI, V, IV, III and II were distributed along the decreasing direction of soil water and salt content, and the distribution of artificial vegetation community was relatively concentrated, which indicated that artificial vegetation configuration had a certain impact on the distribution of shelterbelt vegetation. The results of significance test of environmental factors showed that Mg^{2+} , Na^+ and soil water

收稿日期: 2020-10-23

修回日期: 2021-01-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“不同气候区新材料研发、筛选与施配技术及效果研究”(2018YFC0507101)

第一作者: 冯亚亚(1995—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 2919809642@qq.com。

通讯作者: 汪季(1957—), 男(汉族), 山东省济南市人, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治方面的研究。Email: wangji1957@163.com。

content had a significant effect on the distribution of vegetation community in shelterbelt system. [Conclusion] In terms of soil water and salt factors, soil Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} and soil water content are the main factors affecting the plant community distribution of shelterbelt system.

Keywords: plant community; soil water content; soil water-soluble salt; Jilantai Salt Lake shelterbelt

长期以来,植被群落分布及其影响因子一直是生态学领域重点研究内容之一^[1]。特别是在干旱区荒漠绿洲过渡带,脆弱的生态系统决定了其抗干扰和恢复能力低,自维持和自调控功能弱的特点^[2],生态系统管理面临着诸多难点。荒漠植被作为荒漠生态系统重要组成部分,对于改善荒漠生态环境、维持生态系统稳定性和保障地区经济发展具有重要意义。在干旱荒漠区,气候^[3]、地形^[4]和土壤^[5-6]、地下水环境^[7-8]和人为干扰等因素限制着植物生长和分布,决定了植物群落的演替速度和方向。其中,土壤环境是影响植被生长和分布的主要因子。研究表明,土壤含水量决定了植物的斑块分布,进而促进灌丛下肥岛效应的形成;同时,土壤水盐及其他土壤因子也通过调节草本植物种类及其多度来想荒漠植被群落结构。因此,了解植物与土壤因子的关系对荒漠绿洲过渡带植被恢复和管理非常重要。

吉兰泰盐湖地处内蒙古自治区阿拉善盟境内,气候干旱少雨,风沙活动频繁,风沙危害十分严重。自1983年开始,吉兰泰盐湖建立由半固定沙垄、防护林带、湖滨盐碱滩地等多种下垫面构成的防风固沙林体系,有效的阻止了风沙侵湖现象^[14-16]。但随着营建年限的增加和植被的演替,导致防护林体系人工植被大面积死亡,自然植被逐渐退化,不同下垫面植被分布发生了巨大的变化,严重影响了防沙治沙工作。因此,防护林体系抚育工作迫在眉睫。土壤水盐作为影响荒漠植被生长和分布的重要环境因子,明晰防护林体系植被分布与表层土壤水盐含量的内在联系,对进行人工一天然植被群落抚育和管理具有重要作用。鉴于此,本文以吉兰泰盐湖防护林体系为研究对象,对防护林体系植被进行调查,并运用数量分析和排序

方法,探究不同下垫面植被与土壤含水量和土壤水溶性盐离子间的相关关系,探究影响植物群落分布的主要因素,旨在揭示防护林体系植被群落分布格局与土壤水盐因子等的关系,为吉兰泰盐湖防护林抚育和管理提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属于典型大陆性干旱气候,具有干旱少雨,日年温差大,蒸发量大的气候特点^[14]。最高气温40.9℃,最低气温-31.2℃;该区风沙活动频繁,年平均扬沙日数为82.5d,年风沙流出现频率为112.9次,风力一般在4—5级,平均风速3.6m/s^[15,17]。盐湖土壤种类以灰漠土、风沙土为主,并伴有盐碱土出现。研究区防护林体系始建于1983年,在盐湖西北部建立起了东西长18km,南北宽1km的由半固定沙垄、植物防护林网、湖滨盐碱滩地等多种下垫面构成的,乔、灌、草相结合人工防风固沙林体系^[16]。防护林体系建立之初,人工植被在宏观上根据与主害风垂直方向进行布置,植物种主要以梭梭、花棒、沙拐枣和沙枣为主。其中沙枣主要采用2m×2m和3m×3m株行距,梭梭、花棒和沙拐枣主要采用2m×2m株行距^[16]。自防护林体系建立36a以来,林带不同下垫面景观发上了巨大的变化,沙枣大面积死亡,盐斑裸露现象,逐渐形成人工一天然植被群落(表1)。研究区植被结构简单,植物种类稀少,主要以白刺(*Nitraria tangutorum*)、梭梭(*Haloxyylon ammoo-dendron*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)的等耐旱,耐盐碱的灌木、草本植物为主^[19]。

表 1 样方分布及植被特征

下垫面类型	经纬度	样方数/个	植被特征
半固定沙垄	39°48′32.4″N,105°44′2.4″E	16	白刺、少量梭梭、沙拐枣,草本有沙蓬、雾冰藜、苦豆子等,盖度15%~30%
防护林带	39°48′7.2″N,105°43′48.0″E	23	花棒、沙枣、梭梭,沙蓬、猪毛菜等,其中花棒、沙枣、梭梭等,盖度50%~80%
盐碱滩地	39°47′13.2″N,105°43′51.6″E	16	白刺、怪柳、沙蓬、沙蒿等,盖度30%

1.2 样地选择与样品采集

试验于2019年8月进行,试验期间无降水事件。在吉兰泰盐湖防护林体系内设置4条样线,每条样线均经过半固定沙垄、防护林带和滩地共3种防护林类

型^[20]。样线长3000m,样线间间隔250m,在样线上每隔200m设置一个30m×30m固定样方,共计64个样方,去除人为干扰的样方,共计有55个固定样方(表1)。植被群落采用五点样方法,分别在每个固定

样方内设置 5 个 10 m×10 m 灌木样方,调查样地内灌木的种类、数量、株高、冠幅和盖度等。每个灌木样方设置 5 个 1 m×1 m 草本样方,调查样方内草本植被的种类、数量、株高和盖度等指标。采用重要值作为各种植物在群落中的优势度指标,计算公式为^[16]:

$$\text{重要值 IV} = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 4 \quad (1)$$

土壤样品采集与植被调查同步进行,分别在每个样地采集 0—30 cm 土壤样品 2 份,一份用于土壤含水量测定,另一份自然风干后用于土壤水溶性盐(包括土壤 pH 值、水溶性盐总量、阴离子和阳离子)的测定。土壤含水量采用烘干法测定,土壤 pH 值用玻璃电极测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定; Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法测定; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定;土壤水溶性盐总量采用阴阳离子总量相加的方法测定。依据中国土壤盐渍土划分标准: $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 2$ 为氯化物类型; $1 \leq \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} \leq 2$ 为硫酸盐—氯化物类型; $0.2 \leq \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$ 为氯化物—硫酸盐类型; $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 0.2$ 为硫酸盐类型^[24],对不同植被类型下土壤盐渍化类型进行划分。土壤水溶性盐总量为 8 个离子质量分数之和^[21]。

1.3 数据处理与分析

依据张金屯^[22]和曹静等^[23]人的研究结果,选取研究区分布频度大于 5% 的植物种,应用双向指示种分析(TWINSPAN)对防护林体系植物群落进行数量

分类,依据样地—植物种的重要值数据矩阵,将研究区植被划分为不同群落类型^[23-24],分类软件采用 PC-ORD 生态学软件^[25]。运用典范对应分析(CCA)探讨植被群落与环境因子相关关系^[26],分析采用国际标准生态学软件 Canoco 5。分析方法如下,首先,对物种重要值—样方环境因子数据进行趋势对应分析(DCA),若 DCA 排序轴的梯度长度 < 3 ,则采用线性模型排序;若梯度长度 > 4 时,则采用单峰模型排序;梯度长度位于 3,4,两种模型都适合^[22,26]。

2 结果与分析

2.1 吉兰泰盐湖防护林植物种类与群落类型划分

2.1.1 吉兰泰盐湖防护林植物种类 由表 2 可知,在研究区 55 个样方中,筛选出分布频率大于 5% 的植物种,其中有乔木 1 种,灌木、半灌木 5 种,草本 10 种,包括藜科、禾本科、豆科和怪柳科等共计 8 科 16 属。其中,草本植物优势种以一年生沙蓬、雾冰藜和猪毛菜为主,占样方总数的 74.55%,65.45% 和 65.45%;灌木植物中白刺出现频率最高,为 72.73%,这与白刺具有固沙阻沙,耐旱耐盐碱的生态适应性密切相关。其次是沙拐枣和梭梭,分别为 36.36% 和 34.55%,是吉兰泰盐湖防风固沙林体系的重要组成部分。从整体来看,防护林体系物种组成相对贫乏,优势植物主要以耐旱耐盐碱的灌木、小灌木和草本植物为主,这与研究区干旱少雨,蒸发量大,大陆性干旱气候相适应。

表 2 盐湖防护林植物群落物种组成

科名	属名	学名	生活型	频率/%
藜科(Chenopodiaceae)	碱蓬属(<i>Suaeda</i>)	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)	一年生草本	5.82
	沙蓬属(<i>Agriophyllum</i>)	沙蓬(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	一年生草本	74.55
	碱猪毛菜属(<i>Salsola</i>)	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	一年生草本	65.45
	沙冰藜属(<i>Bassia</i>)	雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)	一年生草本	65.4
	盐生草属(<i>Halogeton</i>)	蛛丝蓬(<i>Halogeton arachnoideus</i>)	一年生草本	18.18
	梭梭属(<i>Haloxyylon</i>)	梭梭(<i>Haloxyylon ammodendron</i>)	灌木	34.55
豆科(Fabaceae)	苦参属(<i>Sophora</i>)	苦豆子(<i>Sophora alopecuroides</i>)	多年生草本	21.82
	岩黄耆属(<i>Hedysarum</i>)	花棒(<i>Hedysarum scoparium</i>)	灌木	25.45
禾本科(Poaceae)	芨芨草属(<i>Achnatherum</i>)	芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)	多年生草本	16.36
	芦苇属(<i>Phragmites</i>)	芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	多年生草本	12.73
怪柳科(Tamaricaceae)	怪柳属(<i>Tamarix</i>)	怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>)	灌木	9.09
菊科(Asteraceae)	蒿属(<i>Artemisia</i>)	沙蒿(<i>Artemisia desertorum</i>)	多年生草本	49.09
	蓝刺头属(<i>Echinops</i>)	砂蓝刺头(<i>Echinops gmelinii</i>)	一年生草本	7.27
白刺科(Nitrariaceae)	白刺属(<i>Nitraria</i>)	白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)	灌木	72.73
胡颓子科(Elaeagnaceae)	胡颓子属(<i>Elaeagnus</i>)	沙枣(<i>Elaeagnus angustifolia</i>)	小乔木	16.36
蓼科(Polygonaceae)	沙拐枣属(<i>Calligonum</i>)	沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)	半灌木	36.36

2.1.2 TWINSpan 群落分类分析 运用 TWINSpan 分类法,依据样方—植物种重要值数据,对研究区主要植物种进行分类,分类时依据中国植被分类原则,

并结合实际样地调查结果,将防护林体系植被划分为 6 个群落类型,依据各群落优势种和指示种命名群落类型。分类结果如图 1 所示。

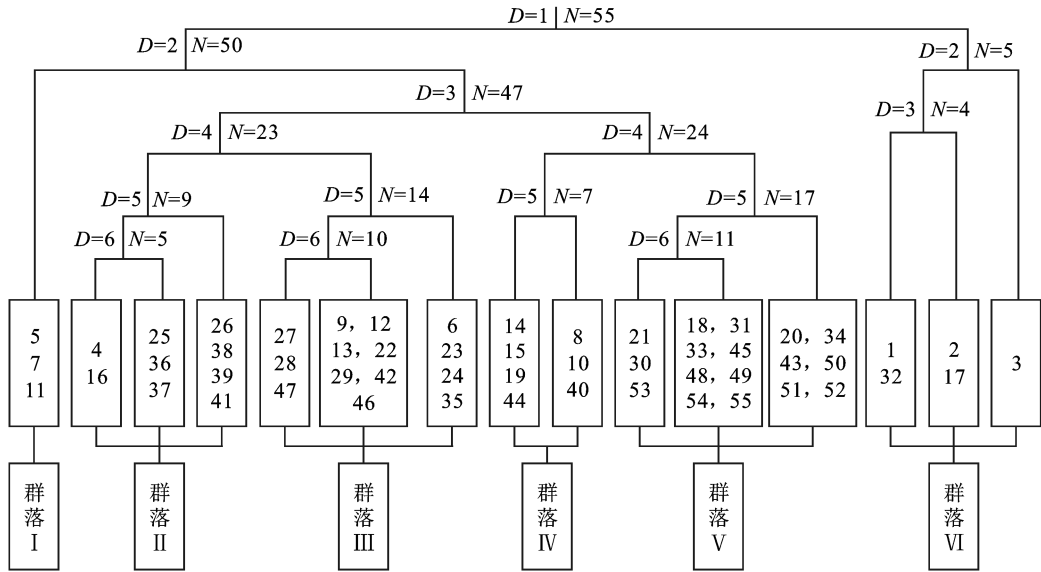


图 1 双向指示种分类(TWINSpan)的树状图

① 群落 I。沙枣+蛛丝蓬+雾冰藜+猪毛菜群落。该类型群落包括样地 5, 7, 11 共 3 个,样方于分布防护林带,优势种为沙枣,样方内沙枣均为人工种植,株高最高可达 3.2 m,群落结构物简单;优势种为沙枣,伴生种花棒、沙拐枣、猪毛菜、沙蓬等。② 群落 II:沙拐枣+白刺—猪毛菜群落。包括 4, 16, 25, 26, 36~39, 41 共 9 个样地,样地分布于半固定沙垄。优势种为沙拐枣,伴生种包括沙蓬、雾冰藜、花棒等。③ 群落 III。梭梭—沙蓬+雾冰藜—沙蓬—猪毛菜群落。包括 6, 9, 12, 13, 22~24, 27~29, 35, 42, 46, 47 共 14 个样地。样方于分布防护林带和半固定沙垄,优势种为梭梭,伴生种包括沙拐枣、沙蒿等。④ 群落 IV。花棒—白刺—雾冰藜—沙蓬群落。包括 8, 10, 14, 15, 19, 40, 44 共 7 个样地。样方主要分布于防护林带,优势种为花棒,伴生种沙蒿、猪毛菜等。⑤ 群落 V。白刺+沙蓬—沙蒿群落。包括样地 18, 20, 21, 30, 31, 33, 34, 43, 45, 48, 49, 50~55 共 17 个样地,样地分布于滩地和防护林带,优势种为白刺,伴生种有苦豆子、砂蓝刺头等。⑥ 群落 VI。白刺—柽柳群落。包括样地 1, 2, 3, 17, 32 共 5 个样地。样方主要分布于滩地,优势种为白刺,伴生种有碱蓬和沙蒿。通过对样方分类发现,除了群落 V 和群落 VI 优势种为白刺外,其余群落优势种均为人工种植灌木,群落 I、群落 II、群落 III 和群落 IV 草本植物种数明显高于其他群

落,且由于受到人工林的影响,草本植物平均高度较低,长势较差。

2.2 不同群落类型下土壤水盐特征分析

由表 3 可知,研究区不同植被群落类型下土壤水盐因子存在显著差异。整体来看,不同类型下表层土壤含水量均表现为较低水平,且群落 V 和群落 VI 土壤含水量显著高于其他群落类型。就土壤水溶性盐而言,群落 II、群落 III 和群落 IV 下土壤 K^+ , Na^+ , Ca^+ , Mg^{2+} 等阳离子含量均显著低于群落 I,群落 V 和群落 VI,其中群落 VI 土壤水溶性阳离子含量最大,分别为 0.04, 0.26, 0.07 和 0.04 g/kg,整体来看,不同植被类型下土壤水溶性 Na^+ 离子含量最高,分别占土壤总盐量的 46.87%, 39.5%, 31.79%, 33.6%, 49.42% 和 54.19%,且群落 I,群落 V 和群落 VI 中 Na^+ 所占比例明显高于其他群落类型。对于土壤水溶性阴离子,不同植被类型下含量差异并不明显,其中 CO_3^{2-} 含量均为 0。整体来看,土壤含盐量变化趋势与水溶性阳离子相似,不同类型下土壤水溶性盐总量变化趋势为:群落 VI > 群落 V > 群落 I > 群落 IV > 群落 II > 群落 III,而群落 V, VI 和群落 I 下土壤水溶性盐总量显著高于其他群落类型。

整体来看,在本研究中,除群落 I 土壤盐害类型为氯化物类型(Cl^-/SO_4^{2-} 为 2.05),其植物群落土壤盐害类型均为氯化物—硫酸盐类型($0.2 \leq Cl^-/SO_4^{2-} < 1$)。

表 3 不同植物群落类型下土壤水盐因子特征分析

环境因子	类型 I	类型 II	类型 III	类型 IV	类型 V	类型 VI
含水量/%	0.760±0.032 ^b	0.723±0.049 ^b	0.767±0.055 ^b	0.873±0.102 ^b	1.197±0.080 ^a	1.240±0.282 ^a
土壤 pH 值	8.490±0.130 ^b	9.020±0.130 ^b	9.000±0.070 ^b	9.160±0.030 ^b	9.190±0.030 ^a	9.210±0.060 ^a
CO ₃ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	0	0	0	0	0	0
HCO ₃ ⁻ /(g·kg ⁻¹)	0.015±0.001 ^a	0.022±0.006 ^{bd}	0.020±0.001 ^{bcd}	0.015±0.000 ^{ac}	0.022±0.001 ^{bd}	0.020±0.003 ^b
Cl ⁻ /(g·kg ⁻¹)	0.039±0.010 ^a	0.008±0.002 ^c	0.008±0.002 ^c	0.014±0.006 ^{cd}	0.022±0.003 ^{bd}	0.030±0.003 ^b
Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.065±0.007 ^c	0.043±0.008 ^{ad}	0.034±0.001 ^d	0.061±0.011 ^{bc}	0.050±0.010 ^{ab}	0.070±0.005 ^c
Mg ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.019±0.002 ^c	0.016±0.002 ^c	0.016±0.001 ^c	0.018±0.003 ^c	0.028±0.004 ^b	0.040±0.004 ^a
SO ₄ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	0.019±0.002 ^c	0.016±0.002 ^c	0.016±0.001 ^c	0.018±0.003 ^c	0.028±0.004 ^b	0.040±0.004 ^a
K ⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.032±0.004 ^{cd}	0.028±0.003 ^{bd}	0.023±0.004 ^b	0.027±0.001 ^{bd}	0.037±0.004 ^{ac}	0.040±0.002 ^a
Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	0.172±0.018 ^{bd}	0.087±0.027 ^c	0.062±0.011 ^c	0.080±0.023 ^c	0.173±0.028 ^b	0.260±0.022 ^a
含盐量/(g·kg ⁻¹)	0.367±0.027 ^{bd}	0.220±0.046 ^c	0.195±0.004 ^c	0.238±0.039 ^c	0.350±0.053 ^b	0.480±0.032 ^a

注:表中数据为平均值±标准差;同列中不同字母表示不同群落类型下环境因子在 0.05 水平存在显著性差异。

2.3 防护林植被群落与土壤水盐因子的 CCA 排序分析

防护林体系植物重要值一样方土壤水盐因子矩阵的 DCA 排序结果表明,所有轴的梯度长度最大为 4.5,且研究证明,CCA 排序法更适合用于干旱区沙地植物分布及其环境解释^[25-26],故选用 CCA 分析植物群落分布与土壤水盐因子的关系。从 CCA 排序汇总表可知(表 4),CCA 第 1 轴特征值为 0.381,第 2 轴特征值为 0.176,占有排序轴特征值总和的 68.8%,Gauch 研究表明,如果前 3 个主要特征向量的方差占总方差的 40%以上,则排序结果是有效的^[27],因此,本研究只保留前两轴的数据来研究防护林体系植物群落分布特征与土壤水盐因子的关系。

表 4 植被群落分布特征的 CCA 排序

项目	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴
特征值	0.381	0.176	0.137	0.115
物种—环境因子相关性	0.818	0.703	0.631	0.654
物种数据累计贡献率/%	9.520	13.92	17.350	20.230
物种—环境因子关系累计贡献率/%	37.560	54.920	68.450	79.830

进一步分析得到防护林体系植物种与土壤水盐因子二维排序图(图 2)。图中箭头连线长短代表植物种分布与该环境因子相关性的大小,连线越长,代表相关性越大,而箭头所处象限代表土壤因子与排序轴间的正负相关性;环境因子与植物种之间关系可以做某一植物种与环境因子连线的垂直线来表示,若垂直线与环境因子连线相交点在箭头正方向,表示该植物种与环境因子为正相关关系,相交点在箭头负方向,表示该植物种与环境因子为负相关。

由 CCA 排序图(图 2)和土壤水盐因子与排序轴相关关系表(表 5)可知,土壤含水量、Mg²⁺、Na⁺ 和水溶性盐总量箭头长度明显大于其他水盐因子,且与第

一排序轴较小(相关系数分别为 0.644,0.631,0.602,0.596),说明土壤含水量、水溶性盐总量、Mg²⁺ 和 Na⁺ 对防护林体系植物种分布有着重要的影响。土壤 pH, HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 与第二排序轴夹角较小,但土壤 pH 值箭头长度明显大于 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻,表明土壤 pH 对防护林体系植物分布的影响程度要大于 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻。因此,土壤水盐因子中,土壤含水量、和土壤水溶性阳离子是影响防护林体系植物群落特征主要因素。从植物种在排序图中的分布来看(图 2),白刺、柽柳、砂蓝刺头和苦豆子等 4 种植物分布在排序轴右侧,表明这 4 种植物与土壤含水量和土壤水溶性盐呈正相关关系。其中,白刺和柽柳主要受到土壤含水量的影响;除了白刺、柽柳、砂蓝刺头和苦豆子外,其余植物种均分布在第二排序轴左侧,表明这些植物种与土壤水盐因子呈负相关关系。其中花棒和沙拐枣主要受 Na⁺ 的影响,梭梭主要受 Mg²⁺ 的影响。

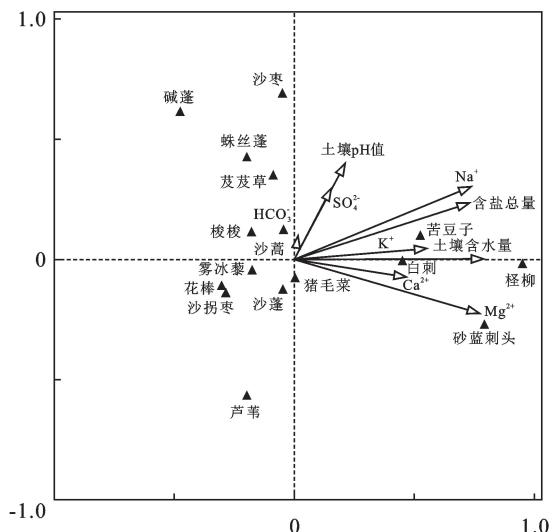


图 2 不同植物种与环境因子的 CCA 排序图

表 5 土壤水盐因子与排序轴相关关系

环境变量	土壤含水量	土壤 pH 值	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	水溶性盐总量
第 1 轴	0.644*	0.173	0.012	0.524*	0.126	0.381*	0.631*	0.450*	0.602*	0.596*
第 2 轴	0.002	0.280*	0.069	0.180	0.207	0.052	0.157	0.032	0.212	0.164

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。

由不同植被类型与环境因子的 CCA 排序图可知(图 3),由于 Cl⁻ 与土壤总含盐量的共线性,因此分析过程中将 Cl⁻ 将排除在外。研究发现,双向指示种分类(TWINSPAN)结果与 CCA 植被样方—土壤水盐因子排序图分类结果较为吻合。在排序图中,除群落 I 外,群落 IV 到群落 II 分布随土壤水盐含量降低方向依次排开,群落 VI(白刺—怪柳群落)生境土壤表现出具有较高的土壤含水量和土壤含盐量,主要分布于离盐湖湖心较近、土壤水盐含量均较高的滩地。群落 V(白刺+沙蓬—沙蒿群落)生境条件与群落 VI 相似,而以人工灌木为优势种植物群落分布较为集中。整体来看,不同植被群落类型样方分布存在一定程度重叠。土壤水盐因子与植物群落样方 CCA 排序图直观的反映出防护林体系不同植物分布的相关关系。

著水平,其他因子对植被群落分布影响并不显著。环境因子显著性检验结果表明,土壤水盐因子对植物群落分布仅能解释 25.2%,未解释部分占 74.8%。

表 6 环境因子显著性检验结果

环境因子	解释量/%	贡献率/%	伪-F	p
Mg ²⁺	6.5	25.6	3.7	0.002
Na ⁺	3.6	14.3	2.1	0.030
SO ₄ ²⁻	3.2	12.6	1.9	0.020
土壤含水量	3.1	12.4	1.9	0.028
K ⁺	2.2	8.8	1.3	0.202
Ca ²⁺	2.3	9.1	1.4	0.180
HCO ₃ ⁻	1.9	7.5	1.2	0.284
含盐总量	1.3	5.2	0.8	0.606
土壤 pH 值	1.1	4.5	0.7	0.764

3 讨论

植被是反映某一地区生态环境特征的重要指标^[28],研究表明,在该研究区自然条件恶劣的条件下,植物物种少,群落结果简单,生活型单一的特点^[16]。由于草本植物作为生态恢复的先锋植物,具有适应力强,生活史短暂,生态位较宽等特点^[29],造成研究区植物种主要以草本植物为主(占植物种总数的 62.5%),促进了研究区植被的正向演替。TWINSPAN 分类将防护林体系植被划分为 6 个群落类型,6 个群落类型的分布代表了生境梯度的变化,同时也是防护林人工植被与天然植物群落在特定生境条件下演替的结果。

研究表明,不同植被类型在 CCA 排序图上从第一排序轴正方向到负方向,即沿土壤水盐含量降低的方向有序分布,较好的反映了双向指示种分类结果的有效性。其中以人工植物(梭梭、花棒和沙拐枣)为优势种的植被群落分布较为集中,且分布范围有一定的重叠,表明防护林体系下土壤水盐因子和人工植被配置在很大程度上决定了植物中的分布^[30]。

采用数量分类和排序的方法,对研究区植物群落与土壤水盐因子关系进行研究,发现研究区人工—天然植被群落不同植物种分布在不同生境中,如怪柳、白刺、苦豆子和砂蓝刺头主要分布于高水盐含量的滩地,表明这 4 种植物具有较强的耐盐能力较强^[31]。但 CCA 排序较难得出直接影响某一植物种的土壤水盐

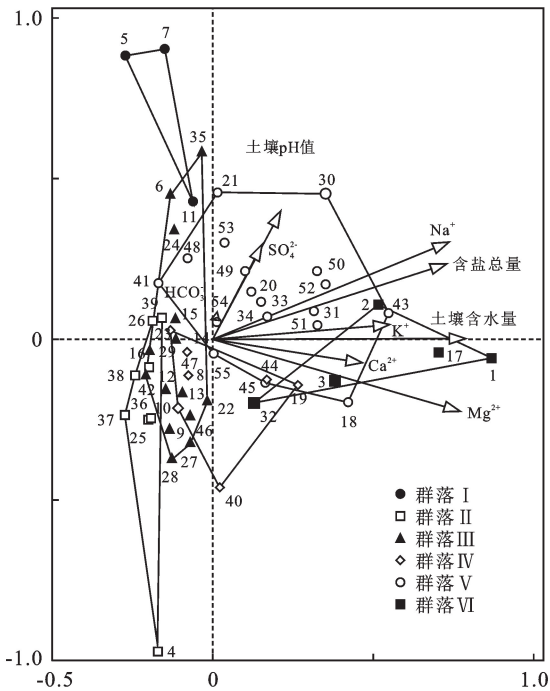


图 3 不同植被类型与环境因子的 CCA 排序图

通过对环境因子进行 MonteCarlo 检验(表 6)发现,不同土壤水盐因子对防护林体系植物群落分布重要性有依次为 Mg⁺, Na⁺, SO₄²⁻、土壤含水量、K⁺, Ca⁺, HCO₃⁻、土壤总含盐量和土壤 pH,其中 Na⁺, Mg⁺ 和土壤含水量对防护林体系植被群落分布影响达到显

因子。从整体来看,土壤 Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} 含量是制约植物种和植物群落类型分布主要的土壤水溶性盐离子。这与何明珠等^[32]人对阿拉善高原荒漠植被分布特征及其环境解释研究基本一致。研究表明,可溶性盐离子的积累会对植物生长造成毒害作用,抑制植物生长发育^[33-34]。其中,土壤 Na^+ 含量过高会破坏渗透调节,同时导致土壤板结的可能性增大,阻碍植物的生长^[35]。目前有关土壤 Mg^{2+} , Na^+ 含量与植物群落的关系的研究较少,今后,植物群落分布与土壤水溶性盐的关系还有待深入研究。

除土壤 Mg^{2+} , Na^+ 含量外,从排序图中可以看出,表层土壤含水量也对防护林体系植被分布起到重要作用。在干旱半干旱区,土壤水分是制约植被分布格局的重要因子,特别是草本植物,张佳等人研究发现,土壤含水量对草本植物的生长、分布、组成和生态系统功能产生直接影响^[36];土壤 pH 作为反映土壤理化性质的重要指标,其大小直接影响到土壤肥力状况和有效性^[37],进而影响植物生长发育。Schuster^[38]研究发现,在碱性土壤中,植被分布与土壤 pH 值不存在显著性关系。尹德洁^[39]对山东滨海盐渍区植被群落特征与土壤化学因子关系研究发现,山东滨海盐渍区土壤 pH 均值为 8.09,土壤 pH 值与植被分布不存在相关性。在本研究中,不同植被类型下土壤 pH 值均大于 8,且排序结果表明,研究区不同植被群落分布与土壤 pH 不存在显著相关性,这与何明珠对阿拉善高原植被分布与环境因子关系研究相一致^[32],并验证了 Schuster 研究结论。

在干旱半干旱区,影响荒漠植被分布格局的因素包括地下水、土壤含水量和土壤盐分等环境因子,在小尺度下,土壤环境是影响植被分布的主要因素^[3-6]。研究结果表明,表层土壤含水量、白刺土壤水溶性盐对于植物群落分布仅能解释 25.2%,未解释部分占 74.8%。在一定程度上反映出植被与表层土壤含水量和土壤水溶性盐的关系。这与赵鹏^[18]、贺强等^[40]人研究结果相一致。但本研究仅从土壤水盐出发讨论荒漠植被类型及其空间分布与环境的关系。而各类环境因子对植物群落分布的相对作用并不绝对。其余未解释部分可能包括土壤养分和风沙活动对荒漠植被分布的影响。

4 结论

(1) 通过对吉兰泰盐湖防护林体系进行植被群落调查发现,研究区分布频率 $>5\%$ 的植物隶属于 8 科 16 属。植物群落结构简单,物种组成稀少。优势植物主要以耐旱的灌木、小灌木和草本植物为主。

(2) 双向指示种分类(TWINSPAN)将防护林体系内植被分为沙枣+蛛丝蓬+雾冰藜+猪毛菜群落、沙拐枣+猪毛菜群落、梭梭—沙蓬+雾冰藜—沙蓬—猪毛菜群落、花棒—白刺—雾冰藜—沙蓬群落、白刺+沙蓬—沙蒿群落和白刺—柽柳群落共 6 个类型。不同群落类型间植被数量特征存在显著差异,白刺+沙蓬—沙蒿群落和白刺—柽柳群落下土壤水盐含量与其他群落类型存在显著差异,且研究区土壤盐害类型主要以氯化物—硫酸盐为主。

(3) CCA 排序结果验证了 TWINSPAN 数量分类的合理性,不同植物种在排序图的分布表明人工植被配置和土壤水盐是影响防护林植物群落类型及其分布的重要因素。显著性检验结果表明,就土壤水盐因子而言,土壤 Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} 含量和土壤含水量是影响吉兰泰盐湖防护林体系植物群落类型及其空间分布的主要因子。

[参 考 文 献]

- [1] 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等.贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J].生态学报,2015,35(2):434-448.
- [2] 赵鹏.民勤绿洲荒漠过渡带植被空间分布及其环境解释[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2014.
- [3] 钱亦兵,吴兆宁,张立运,等.古尔班通古特沙漠生境对植物群落格局的影响[J].地理学报,2004,59(6):895-902.
- [4] 刘海江,郭柯.浑善达克沙地丘间低地植物群落的分类与排序[J].生态学报,2003,23(10):2163-2169.
- [5] 宋创业,郭柯,刘高焕.浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系[J].生态学杂志,2008,27(1):8-13.
- [6] 王新源,马仲武,王小军,等.不同沙化阶段寒旱草甸植物群落与表土环境因子的关系[J].生态学报,2020,40(19):1-13.
- [7] 曾晓玲,刘彤,张卫宾,等.古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响[J].生态学报,2012,32(5):1490-1501.
- [8] 姜小妮.柴达木盆地南部土壤—地下水水盐环境对植被分布的影响研究[D].陕西 西安:长安大学,2019.
- [9] 龙婷,王健铭,李景文,等.青藏高原北部戈壁区植物多样性及其环境解释[J].北京林业大学学报,2017,39(12):17-24.
- [10] 霍举颂,刘卫国,刘建国,等.影响阜康荒漠—绿洲过渡带荒漠植物数量特征的土壤驱动力分析[J].生态学报,2017,37(24):8304-8313.
- [11] 张荣,刘彤.古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类[J].生态学报,2012,32(19):6056-6066.
- [12] 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的关系[J].生态学报,2016,36(11):3206-3215.
- [13] Johnson B G, Verburg P S J, Arnone J A. Plant species

- effects on soil nutrients and chemistry in arid ecological zones [J]. *Oecologia*, 2016, 182(1): 1-19.
- [14] 高永. 吉兰泰盐湖环境演化及沙害成因[J]. 干旱区研究, 1996, 13(4): 54-56, 66.
- [15] 丁延龙, 汪季, 胡生荣, 等. 吉兰泰盐湖风沙防护林体系建立 35 a 以来防沙效益评估[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 111-119.
- [16] 郝清华. 吉兰泰盐湖周边地区不同植被恢复方式效果研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [17] 王心源, 郭华东, 邵芸, 等. 利用多源遥感对吉兰泰盐湖沙漠侵害研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 110-112.
- [18] 赵鹏, 徐先英, 屈建军, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1496-1505.
- [19] 徐涛. 不同干扰方式对吉兰泰盐湖区植被及土壤的影响[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [20] 管雪薇, 汪季, 丁延龙, 等. 吉兰泰盐湖防风固沙林体系土壤理化性状特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 114-120.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [22] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [23] 曹静, 苗艳明, 冯飞, 等. 稀有种不同处理对典范对应分析排序结果影响的比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 167-175.
- [24] Craig Morris. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 [J]. *African Journal of Range & Forage Science*, 2015, 32(4): 289-290.
- [25] 郭水良, 于晶, 陈国奇. 生态学数据分析: 方法、程序与软件[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [26] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地植物群落分布与土壤特性关系的 DCA, CCA 及 DCCA 分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 947-954.
- [27] Gauch H G. Multivariate analysis in community ecology Cambridge [M]. UK: Cambridge University Press, 1982.
- [28] Siefert A, Ravenscroft C, Althoff D, et al. Scale dependence of vegetation-environment relationships: A meta-analysis of multivariate data [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23: 942-951.
- [29] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
- [30] 赵德怀, 李素清. 晋西北丘陵风沙区人工植被数量分类与排序研究[J]. 山西师范大学学报: (自然科学版), 2011, 25(1): 103-109.
- [31] 刘帅华. 柴达木地区 4 种灌木的盐胁迫响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [32] 何明珠, 张志山, 李小军, 等. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释(I): 典型荒漠植被分布格局的环境解释[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 46-56.
- [33] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423-2430.
- [34] 任志彬, 王志刚, 聂庆娟, 等. 盐胁迫对锦带花幼苗生长及不同部位 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 离子质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 24-26, 49.
- [35] 王静. 阿拉尔绿洲植被与苦咸水分布的关系研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2019.
- [36] 张佳, 李生字, 靳正忠, 等. 防护林下草本植物层片物种多样性与环境因子的关系[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 118-125.
- [37] 马云波, 许中旗, 张岩, 等. 冀北山区华北落叶松人工林对土壤化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 165-170.
- [38] Schuster Diekmann S M. Forum: Calcium and plant species richness changes in species density along the soil pH gradient: Evidence from german plant communities [J]. *Folia Geobotanica*, 2003, 38(4): 367-379.
- [39] 尹德洁, 张洁, 荆瑞, 等. 山东滨海盐渍区植物群落与土壤化学因子的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3521-3529.
- [40] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 676-687.