

采砂迹地型湿地恢复过程中植物群落分布与土壤环境因子的关系

李伟, 崔丽娟*, 赵欣胜, 张曼胤, 王义飞, 赵玉辉, 张岩, 李胜男

中国林业科学研究院湿地研究所//国家林业局湿地研究中心, 北京 100091

摘要: 利用 TWINSpan (双向指示种分析) 和 CCA 排序 (典范对应分析) 的方法, 对北京西卓家营采砂迹地型退化湿地植被进行了群落类型划分, 并探讨了湿地植被空间分布与土壤环境因子关系, 确定了影响湿地植被空间分布的关键因子。结果表明: 38 个样方 40 个植物种可划分为 7 个群落类型, 即茭白+针蔺群落 (*Zizania latifolia*+*Eleocharis congesta*); 牛鞭草+旋覆花+野艾蒿+竹节灯心草+茵陈蒿+扁杆蔗草群落 (*Hemarthria sibirica*+*Inula japonica*+*Artemisia lavandulifolia*+*Juncus turczanowii*+*Artemisia capillaries*+*Scirpus planiculmis*); 千屈菜+苜蓿菜+小香蒲群落 (*Lythrum salicaria*+*Herba Sonchi Brachyoti*+*Typha minima*); 竹节灯心草+问荆+酸模叶蓼+芦苇群落 (*Juncus turczanowii*+*Equisetum arvense*+*Polygonum lapathifolium*+*Phragmites australis*); 针蔺+扁杆蔗草+茵陈蒿+野艾蒿群落 (*Eleocharis congesta*+*Scirpus planiculmis*+*Artemisia capillaries*+*Artemisia lavandulifolia*); 鬼针草+狗尾草+香蒲群落 (*Bidens pilosa*+*Setaria viridis*+*Typha orientalis*) 和朝天委陵菜+猪毛菜+大刺儿菜+稗群落 (*Potentilla supine*+*Salsola collina*+*Cephalanoplos setosum*+*Echinochloa crusgalli*)。植物群落物种和土壤因子的 CCA 分析表明: 益母草、大车前、猪毛菜主要受土壤 pH 的影响; 茭白主要受氮、土壤有机质 (SOM) 的影响; 马唐、鸡眼草主要受土壤全氮 (TN) 和 Mg^{2+} 的影响; 针蔺、狼把草受土壤 K^+ 的影响; 苦苣菜、苜蓿菜、牛鞭草主要受土壤 Na^+ 的影响; 黄香草木犀主要受土壤 Cl 的影响; 灰绿藜、大刺儿菜、球穗莎草主要受土壤 NO_3^- 的影响; 扁杆蔗草、小香蒲主要受全磷 (TP) 和含水率的影响。研究结论将为采砂迹地型湿地恢复提供科学支持。

关键词: 湿地恢复; 双向指示种分析; 典范对应分析; 土壤因子

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 10-2325-07

自然界的植物群落空间分布格局受环境因素、生物因素、空间因素以及各种随机因素的影响, 其中土壤是植物生存生活的基质, 是影响植物群落空间分布格局的主要环境因素和植物生存的重要环境条件之一^[1-2]。土壤影响植物群落的结构和功能, 其养分的差异会导致群落中植物多样性及其空间格局的不同^[3-4]。土壤是植被生存的基础, 植被生长所需要的养分和水分大多都是通过土壤起作用, 土壤环境在植被的生长、发育及其群落演替等方面也起着举足轻重的作用。植被分类与排序是揭示植物群落空间分布与环境因子之间相关关系的重要手段^[2,5-16]。目前, 关于植物群落排序方面方法大体分为间接和直接两种类型^[8]。直接排序方法需要同时使用植物群落 (或样地) 的物种组成矩阵和环境因子矩阵, 这类排序方法中, 典范对应分析应用较为普遍。直接排序由于同时结合了物种组成数据和环境因子数据, 能够很好地揭示植被与环境因子之间的关系, 近 10 年来, 逐渐受到生态学者的青睐^[8-9]。湿地恢复是湿地研究的一个热点内容^[17]。本研究通

过对采砂迹地型退化湿地植被及其土壤环境因子进行双向指示种 (TWINSpan) 分类和典范对应分析 (CCA), 分析影响植物生长的土壤环境因子之间及其与西卓家营湿地植物分布之间的关系, 揭示植被及其环境因子的空间分布格局, 明确其相互作用的数量关系, 旨在指导该区植被恢复与重建。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于北京市延庆县城以西 9.00 km 处, 面积约 66.67 hm^2 , 年平均气温 8.00 , 多年平均降水量为 493.00 mm, 其年际变化较大 (274.0~747.1 mm), 属温带大陆性季风气候。该区为采砂迹地, 植被稀少, 水体散乱, 土壤沙砾质, 保水能力较差。由于挖沙等人为活动, 原生植被破坏严重, 现仅存小部分原生植被。原生植物群落主要有芦苇群落、莎草群落、香蒲群落、苻菜群落和水鳖群落等。目前水域面积仅存 19.2 hm^2 , 主要由一系列大小不等的非连续水体构成, 水源补给主要源于自然降水及地下渗水。西卓家营湿地恢复工程

基金项目: 北京市科技计划重大项目 (D08040600580000); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD03A19)

作者简介: 李伟 (1981 年生), 男, 博士研究生, 主要从事湿地恢复研究。E-mail: wetlands207@163.com

*通讯作者: 崔丽娟, 女, 研究员, 主要从事湿地生态研究。E-mail: lkyclj@126.com

收稿日期: 2010-09-28

包括水力连通重建、微地形改造、基质恢复、植被恢复和岸带护坡等,于 2008 年初启动,经过为期 4 个月的施工,于 2008 年 6 月结束。通过对恢复后的湿地生态系统进行植被调查与恢复前的资料对比,植被总覆盖率由湿地恢复前的 13% 增加到恢复后的 69%; 植物种类也明显增多,由恢复前的 74 种增加为恢复后的 204 种,恢复效果明显。

1.2 调查方法

数据采集于 2009 年 8 月,在研究区内,由北向南设置 6 条平行样带,间距 100 m 左右。考虑到研究区面积不是很大,在每条样带上沿环境梯度设置样地 5~8 个(分别为 5、6、8、8、6、5 个),每个样地设 3 个 1 m×1 m 小样方。用于数量生态学分析的样地有 38 个,同时记录每一样地植物种类、每种植物株数、株高、多度、盖度以及样方的总盖度。在 38 个样地中共调查到 65 个物种,剔除频度小于 5% 的 25 个物种后,构成 38×40 个物种的数据矩阵。多度采用 Drude 多度级:7,植物数量很多,植株密集,形成背景;6,植物数量很多;5,植物数量多;4,植物数量尚多;3,植物数量不多,散布;2,植物数量稀少,偶见;1,植物在样方中只有 1 株;0,植物在样方中不存在。

在每个样地的对应小样方内随机取土样 3 个土壤表层(0~20 cm)样品,混合后回室内分析,并取平均值作为计算参数。土壤环境指标包括土壤含水率(MC)、pH、电导率(Cond)、有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、 K^+ 、 Na^+ 、氨态氮(NH_4-N)、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 共计 14 个指标,因而组成 38×14 的环境因子矩阵。其中,pH 采用 5 1 水土比酸度计测定、电导率采用 5 1 水土比电导法、有机质(SOM)用重铬酸钾-浓硫酸氧化法、全氮(TN)用碱解扩散法、全磷(TP)用高氯酸-硫酸法、 K^+ 用原子吸收法、 Na^+ 用原子吸收法、氨态氮(NH_4-N)用连续流动分析仪测定、 Cl^- 用莫尔法、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用 EDTA 滴定法、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 用离子色谱仪法。

1.3 研究方法

(1) TWINSpan 分析(Two way Indicator Species Analysis,双向指示种分析)。该方法是国际上通用的一种等级分类方法,能够同时完成样地和种的分类,在植被生态学中广泛应用,采用 Cornell 生态学软件包中的 TWINSpan 程序对植物群落进行 TWINSpan 数量分类,得到第 1 排序轴,再以排序轴为基础进行分类。在执行 TWINSpan 分析的过程中需要设定相应参数,包括“假种(Pseudospecies)”切割水平、分类最大水平数、各假种水平加权值、指示种指示潜力等^[18-19]。

(2) CCA 排序(Canonical Correspondence Analysis,典范对应分析)。在 CCA 排序之前,进行冗余分析(RDA)。冗余分析(RDA)是一种直接梯度分析方法,是基于统计学的角度评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系。经过冗余分析检验,DCA 以及 DCCA 效果不如 CCA,因此,本文选择 CCA 排序方法。CCA 排序方法已被广泛应用于植被、种类分布与环境因子关系研究,是基于对应分析发展而来的一种排序方法,是由 CA/RA 修改而产生的新方法,是把 CA/RA 与多元回归分析结合起来,每一步计算均与环境因子进行回归,用于研究植被与环境的关系,又称多元直接梯度分析^[3]。

2 结果与分析

2.1 TWINSpan 分类

对 38 个样方进行 TWINSpan 等级分类,依据《中国植被》和《中国湿地植被》中的分类系统,结合调查结果的生态分析和群落生境特征的指示种及其组合划分为 7 个群落类型。植物群落的 TWINSpan 分类结果矩阵见图 1 所列。38 个样方 40 个植物种可划分为:茭白+针蔺群落(*Zizania latifolia*+*Eleocharis congesta*);牛鞭草+旋覆花+野艾蒿+竹节灯心草+茵陈蒿+扁杆蔗草群落(*Hemarthria sibirica*+*Inula japonica*+*Artemisia lavandulifolia*+*Juncus turczaninowii*+*Artemisia capillaries*+*Scirpus planiculmis*);千屈菜+芭荑菜+小香蒲群落(*Lythrum salicaria*+*Herba Sonchi Brachyoti*+*Typha minima*);竹节灯心草+问荆+酸模叶蓼+芦苇群落(*Juncus turczaninowii*+*Equisetum arvense*+*Polygonum lapathifolium*+*Phragmites australis*);针蔺+扁杆蔗草+茵陈蒿+野艾蒿群落(*Eleocharis congesta*+*Scirpus planiculmis*+*Artemisia capillaries*+*Artemisia lavandulifolia*);鬼针草+狗尾草+香蒲群落(*Bidens pilosa*+*Setaria viridis*+*Typha orientalis*)和朝天委陵菜+猪毛菜+大刺儿菜+稗群落(*Potentilla supine*+*Salsola collina*+*Cephalanoplos setosum*+*Echinochloa crusgalli*)。具体如下:

(1) 茭白+针蔺群落(*Zizania latifolia*+*Eleocharis congesta*)。群落优势种为茭白,针蔺,对群落生境影响大,其平均高度值分别为 180 与 75 cm,喜温的鬼针草、野大豆等成为群落伴生种,其平均高度分别为 130 和 150 cm,对群落有一定影响,但不明显。群落总盖度达 55%~90%。除玄参科植物松蒿外,泽兰、欧地笋等多年生耐旱草本植物也零星分布于群落中,对群落多样性、生境复杂性等方面有一定影响,平均高度分别为 25、23 和 160 cm。

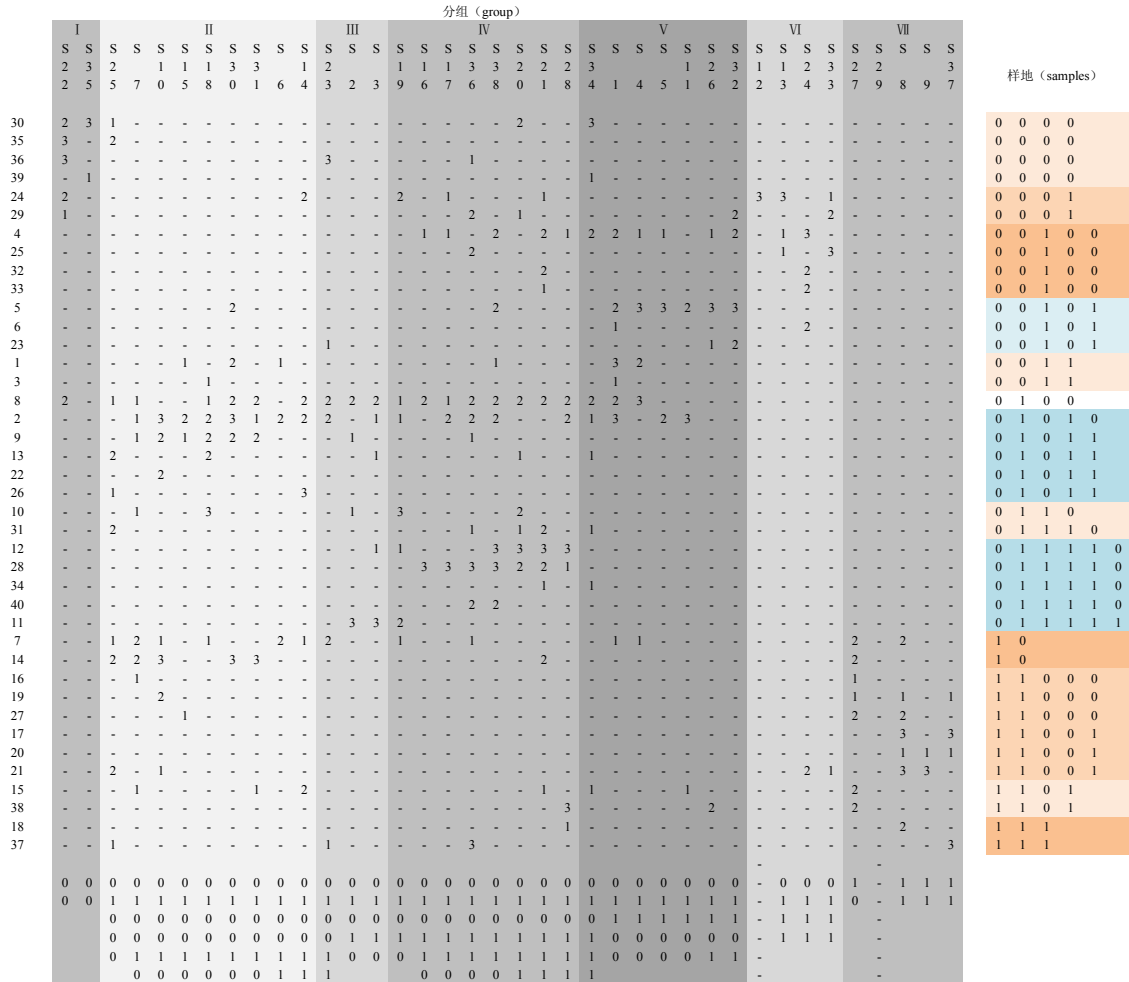
(2) 牛鞭草+旋覆花+野艾蒿+竹节灯心草+茵陈

蒿+扁杆蔗草群落 (*Hemarthria sibirica*+*Inula japonica*+*Artemisia lavandulifolia*+*Juncus turczanowii*+*Artemisia capillaries*+*Scirpus planiculmis*)。群落中的优势种有牛鞭草、旋覆花、野艾蒿、茵陈蒿等多为喜温、耐旱植物,其平均高度分别为 77、29、70 和 95 cm,竹节灯心草和扁杆蔗草多见于河岸湿润地方,其高度值分别为 32、65 cm,在群落中占据优势地位,对群落生境影响较大。野大豆、直立黄芪、苔草为群落伴生种,偶见于湖边湿润地方,但其高度均值较高,分别为 44、52 和 75 cm,对群落生境有一定的影响。群落总盖度为 60%~100%,除泽泻、大车前、黄香草木犀等喜温耐湿植物外,苦苣菜、苜蓿菜等菊科植物也在群落中零星分布。由于不同植物生态习性及其群落生境的差异,枯落物总盖度变化较大,为 2%~100%。

(3) 千屈菜+苜蓿菜+小香蒲群落 (*Lythrum*

salicaria+*Herba Sonchi Brachyoti*+*Typha minima*)。草本植物千屈菜、苜蓿菜和小香蒲多见于群落,占据群落优势地位,对群落生境的形成及变化具有直接作用,其高度值分别为 170、62 和 150 cm。野大豆与野艾蒿等部分豆科和菊科植物偶见于群落中水分较少、土壤肥力较差的地方,但对群落构成具有一定影响,在群落中占有一定程度的重要性,其高度值分别为 53 和 63 cm,为群落伴生种。群落总盖度为 75%~100%,除牛鞭草、旋覆花等喜温暖湿润生境的草本植物外,褐穗莎草、茵陈蒿与酸模叶蓼等水生植物也成为群落构成中的一部分,群落枯落物总盖度为 10%~30%,这与群落生境与群落中植物的生态习性差异性较小有关。

(4) 竹节灯心草+问荆+酸模叶蓼+芦苇群落 (*Juncus turczaninowii*+*Equisetum arvense*+*Polygonum lapathifolium*+*Phragmites australis*) 群



1 黄香草木犀, 2 野艾蒿, 3 水蓼, 4 狗尾草, 5 茵陈蒿, 6 鸡眼草, 7 旋覆花, 8 野大豆, 9 大车前, 10 竹节灯心草, 11 小香蒲, 12 芦苇, 13 狼把草, 14 牛鞭草, 15 苜蓿菜, 16 刺儿菜, 17 稗, 18 灰绿藜, 19 山莴苣, 20 球穗莎草, 21 大刺儿菜, 22 苦苣菜, 23 益母草, 24 鬼针草, 25 香蒲, 26 扁杆蔗草, 27 朝天委陵菜, 28 问荆, 29 欧地笋, 30 针蔺, 31 薄荷, 32 无芒稗, 33 马唐, 34 苍耳, 35 茭白, 36 千屈菜, 37 酸模叶蓼, 38 猪毛菜, 39 泽兰, 40 鹅绒委陵菜

图1 湿地植物群落物种的 TW INSPAN 分类图
Fig.1 TW INSPAN classification for 40 plant species

落优势种为竹节灯心草、问荆、酸模叶蓼和芦苇，其在群落中占有主要地位。群落伴生种为唇形科植物水棘针，其高度均值为 88 cm，偶见于河岸沙地等开阔和略湿润的地方。群落总盖度为 60%~100%，鬼针草、假苇拂子茅等禾本科植物以及蒙古香蒲、香蒲与小香蒲等香蒲科多年生沼生植物散布于群落中。

(5) 针蔺+扁秆蔗草+茵陈蒿+野艾蒿群落 (*Eleocharis congesta*+*Scirpus planiculmis*+*Artemisia capillaries*+*Artemisia lavandulifolia*)。群落优势种为莎草科植物针蔺、扁秆蔗草以及菊科植物茵陈蒿和野艾蒿。豆科 1 年生草本植物野大豆为群落伴生种，零星分布于河流沿岸湿生沼泽灌丛中。群落总体盖度为 70%~95%，禾本科植物狗尾草以及唇形科植物益母草散布于群落各处，菊科植物如苍耳、苣荬菜、狼把草，唇形科植物薄荷以及大麻科植物葎草在群落中零星分布。

(6) 鬼针草+狗尾草+香蒲群落 (*Bidens pilosa*+*Setaria viridis*+*Typha orientalis*)。群落优势种为鬼针草、狗尾草和香蒲，其平均高度分别为 81、58 和 162 cm；苣荬菜等耐旱、耐寒的菊科植物偶见于群落中，为群落伴生种。群落总盖度为 84%~100%，除苣荬菜、茵陈蒿等菊科植物外，禾本科植物如无芒稗和牛鞭草等植物在群落中也有分布，喜湿植物如马唐、欧地笋等零星分布于群落较湿润地方，豆科植物鸡眼草及禾本科植物砂引草等耐旱植物在群落中表现为集中分布。

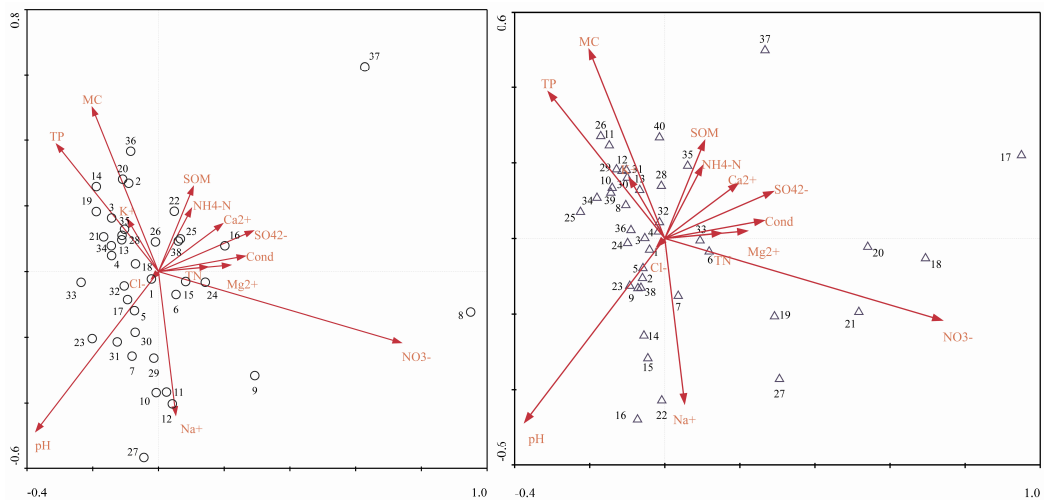
(7) 朝天委陵菜+猪毛菜+大刺儿菜+稗群落 (*Potentilla supine*+*Salsola collina*+*Cephalanoplos setosum*+*Echinochloa crusgalli*)。朝天委陵菜、猪毛

菜、大刺儿菜和稗在群落中占优势，其盖度分别为 30、90、160 和 93 cm，为群落优势种。较耐盐碱、耐旱、耐寒的菊科植物苣荬菜偶见于群落中，为群落伴生种。除菊科植物旋覆花、山萸苣外，禾本科植物牛鞭草等喜湿润生境的植物也见于群落中，群落总盖度为 97%~100%，枯落物总盖度为 20%~60%。小飞蓬、龙葵等喜温暖湿润的草本植物零星散布于群落中。

2.2 植物群落与土壤环境因子的关系

利用典范对应分析(CCA)分析了土壤含水率、pH、电导率、有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、 K^+ 、 Na^+ 、氨态氮(NH_4-N)、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等 14 个土壤因子与西卓家营植被分布的相关关系。CCA 排序图能够很好地揭示植物种分布与环境梯度之间的关系，图 2 中箭头代表各个环境因子；箭头所处象限代表环境因子与排序轴间的正负相关性；箭头连线长短代表植物群落分布与该环境因子相关性的大小，连线越长，相关性越大，连线越短，相关性越小。在分析植物种类和环境因子之间的关系时，可以作某一植物种类与环境因子连线的垂直线，垂直线与环境因子连线交点离箭头越近，表示该种与该类环境因子的正相关性越大，处于另一端的则表示与该类环境因子具有的负相关性越大^[11,15]。

由图 2 和表 1 可以看出， NO_3^- 则与 CCA 第 1 排序轴呈较显著的正相关(相关系数为 0.7379)，位于坐标轴的右侧； Mg^{2+} 、氨氮与环境因子第 2 排序轴呈较显著的正相关(相关系数分别为 0.7895、0.7135)，它们都位于坐标轴的右侧，其中与 Mg^{2+} 连线的夹角较小，说明与第二排序轴相关性较大，



左图数字代表 38 个样地，用圆圈代来表示；右图数字代表 40 种植物群落，用三角形来表示

图 2 38 个样地和 40 种植物群落与土壤因子的 CCA 二维排序图

Fig.2 A two-dimensional scatter plot of CCA ordination for samples and plant species and soils factors

表1 土壤环境因子与 CCA 排序轴相关系数

Table 1 The relative coefficients of the soil environmental factors with the compositor axis of CCA

土壤因子	CCA 排序轴			
	CCA 第 1 排序轴	CCA 第 2 排序轴	CCA 第 3 排序轴	CCA 第 4 排序轴
pH	-0.3726	-0.3125	-0.4853*	0.1843
电导率	0.2633	0.475*	0.0473	0.2968
SOM	0.1059	0.1749	0.2578	0.1482
TN	0.1503	0.1096	0.0144	0.3871
TP	-0.3098	0.0929	0.387	-0.4233*
K ⁺	-0.0946	0.0496	0.1597	0.3128
Ca ²⁺	0.1946	-0.1754	0.1452	0.1574
Na ⁺	0.0526	0.1615	-0.4352	0.382
Mg ²⁺	0.2186	0.7895**	0.02	0.1799
氨氮	0.1001	0.7135**	0.1913	0.4078*
Cl ⁻	-0.0208	0.3349	-0.0213	0.0458
NO ₃ ⁻	0.7379**	-0.0002	-0.2161	0.2607
SO ₄ ²⁻	0.2879	0.6209*	0.124	0.3578
含水率	-0.2014	-0.0941	0.4986*	0.6426*

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

而 pH 则与 CCA 第 2 排序轴呈负相关(相关系数为 -0.3125), 位于坐标轴的左侧; pH、Na⁺ 与环境因子第 3 排序轴呈显著负相关关系(相关系数分别为 -0.4853、-0.4352), 含水率则与 CCA 第 3 排序轴呈显著正相关(相关系数为 0.4986), 位于坐标轴的左侧; TP 与 CCA 第 4 排序轴呈显著负相关关系(相关系数分别为 -0.4233), 位于坐标轴的左侧, 含水率与 CCA 第 4 排序轴呈显著正相关(相关系数为 0.6426), 也位于坐标轴的左侧。通过土壤环境因子与排序轴分析, 得出第一排序轴主要反映了 NO₃⁻, 而第二排序轴反映了 Mg²⁺ 和氨氮。

应用典范对应分析法对西卓家营地区 38 个样地中的 40 种植物以及 38 个样地进行排序分析, 得到植物群落样方及物种和土壤因子的 CCA 二维排序图(图 2)。图 2(右)整体上反映了 40 种植物分布与 14 种土壤因子之间的关系, 除了鸡眼草、稗、灰绿藜、山莴苣、球穗莎草、大刺儿菜、朝天委陵菜、马唐和茭白外, 其它植物都分布在第二排序轴(垂直)的左侧, 主要受土壤含水率、pH、TP、K⁺ 和 Cl⁻ 等因子的影响。其中, 益母草、大车前、猪毛菜主要受土壤 pH 的影响; 茭白主要受氨氮、土壤有机质的影响; 马唐、鸡眼草主要受土壤 TN 和 Mg²⁺ 的影响; 针蔺、狼把草受 K⁺ 的影响; 苦苣菜、苣荬菜、牛鞭草主要受土壤 Na⁺ 的影响; 黄香草木犀主要受土壤 Cl⁻ 的影响; 灰绿藜、大刺儿菜、球穗莎草主要受土壤 NO₃⁻ 的影响; 扁杆蕺草、小香蒲主要受 TP 和含水率的影响; 除马唐外, 其它植物受电导率、Ca²⁺、SO₄²⁻ 的影响不大。

CCA 排序的前 3 个轴只保留了物种数据总方差

表 2 CCA 排序统计结果

Table 2 Statistical results of CCA

	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.56	0.49	0.426	0.358
物种-环境相关性	0.92	0.96	0.921	0.89
累计百分比方差				
物种数据	7.1	13.3	18.7	23.3
物种-环境数据	16	29.9	42.1	52.4

的 18.7%, 因此分析中可能丢失了很大一部分的物种信息。前三轴的物种与环境相关性较高, 共解释了物种-环境关系总方差的 42.1% (表 2)。这一解释量是较高的, 说明土壤环境因素对西卓家营湿地植物群落的分布格局有较大的影响。Gauch 研究的研究表明如果前 3 个主要特征向量的方差占总方差的 40% 以上, 则排序效果是满意的^[20]。因此, 只保留 CCA 的前 3 轴, 就可以较好地反映西卓家营湿地植被与土壤化学因子之间的关系。

3 讨论

通过 TWINSpan 分析, 研究区植被群落类型共分为 7 个群落。植被分类不仅能够根据植被组成反映环境特点和植动态, 而且对评价一个地区植被的生长潜力也是非常有用的^[21-24]。只有认识和掌握不同土壤条件的差别和特点, 才能正确选择适宜的植物种类进行植被恢复。植被类型划分是选择合适的植物种类及拟定合理的植被恢复措施的关键步骤^[25]。在人工加快植被恢复时, 应以原始自然恢复植被为首选植物种类, 不同恢复阶段采用不同植物种类, 同时辅以土壤的理化性质改良, 以期达到最佳效果。

植物群落和群落环境是矛盾的复杂统一体, 作为群落环境组成部分的土壤与植物群落存在一定的联系^[6,26]。通过图 2(右)可以看出, 不同的物种分布于不同的生境, 但较难直接得出影响该物种分布的土壤环境因子, 如物种 37(酸模叶蓼)和物种 22(苦苣菜), 一个处在低 Na⁺ 生境, 一个处在高 Na⁺ 生境, 究竟哪个物种受 Na⁺ 的影响较大仍是一个问题。而西卓家营湿地植物群落的有机质含量都较低, 这可能是由于该湿地恢复时间仅为 1 年, 残落物经分解途径归还土壤较少的缘故。关于植物群落与土壤 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量的关系研究目前还较少。Ca²⁺ 是在盐胁迫中维持植物体内阳离子稳态的关键, 在本研究中, 物种 32(无芒稗)处在高 Ca²⁺ 生境, 物种 19(山莴苣)处在低 Ca²⁺ 生境。Mg²⁺ 是植物必需的营养元素, 在 Na⁺ 较高时, Na⁺ 可以刺激植物对 Mg²⁺ 的吸收。在本研究中, 物种 25(香蒲)处在高 Mg²⁺ 生境, 物种 21(大刺儿菜)处在低 Mg²⁺ 生境。

今后,植物群落分布与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的关系还有待深入研究。

植被分布与土壤环境因子之间的关系已经被广泛研究^[2-5, 27-28],许多研究证实土壤化学因子是影响植被分布的主要因素^[4-5, 7, 9, 27, 29]。在土壤-植被体系中,土壤和植被是相互依存的两个因子,植被影响土壤,土壤制约着植被,土壤环境与植被群落相互联系、相互制约的关系,不但表明了土壤因素在植物群落演替过程中的作用,也揭示了植物群落对土壤性质的恢复和改造作用,这种彼此影响、相互促进的作用是植被恢复演替的动力。同时,由于大多数植物在长期的进化和演替过程中,对不同的环境选择压力已经形成了多种适应性的对策,因此很多植物并不只属于某一种生态类群。例如,芦苇、鬼针草等不仅在湿生的环境中生长,而且在较为干旱的环境中也有相当规模的分布。实际上,大多数植物群落的分布要同时受到多种环境因子的综合影响,适应特定生境的植物种类还是少数的。尽管通过 CCA 分析得出了植被分布与土壤环境因子之间的关系,但由于自然环境的复杂性和植被恢复演替的长期性,给湿地植被恢复研究带来了极大的困难。今后,在湿地植被恢复中应从湿地土壤性质实际出发,考虑用人工促进植被恢复以及自然恢复植被相结合的手段来进行湿地恢复。

参考文献:

- [1] Khaznadar M, Vogiatzakis I N, Griffiths G H. Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(3): 369-377.
- [2] 张元明, 陈亚宁, 张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 903-910.
ZHANG Yuanming, CHEN Yaning, ZHANG Xiaolei. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 903-910.
- [3] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40-49.
SONG Chuangye, GUO Ke. RELATIONSHIP BETWEEN PLANT COMMUNITY AND SOIL ON THE INTERDUNE LOWLAND IN THE MIDDLE OF OTINGDAG SAND LAND[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 40-49.
- [4] 何小琴, 蒋志荣, 王刚, 等. 子午岭地区植被恢复演替过程与环境因子的分类与排序[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(3): 601-607.
HE Xiaoqin, JIANG Zhirong, WANG Gang, et al. The Successional Recovery Process of Plant Communities in Ziwanling Area and Classification and Ordination of Environmental Factors[J]. *Acta Bot Boreo-Occident Sinica*, 2007, 27(3): 601-607.
- [5] 张文辉, 卢涛, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 552-559.
ZHANG Wenhui, LU Tao, MA Keming, et al. Analysis on the environmental and spatial factors for plant community distribution in the arid valley in the upper reach of Minjiang River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 552-559.
- [6] HEDMAN C W, GRACE S L, KING S E. Vegetation composition and structure of southern coastal plain pine forests: an ecological comparison[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 134(1/3): 233-247.
- [7] 王勇, 胡天印, 郭水良. 上海地区早春非耕地杂草分布与环境因子关系的统计生态学研究[J]. *生物数学学报*, 2008, 23(3): 525-533.
WANG Yong, HU Tianyin, GUO Shuilang. Statistical ecological research on relationship of early spring weeds in non-fields with environmental factors in Shanghai suburb[J]. *Journal of Biomathematics*, 2008, 23(3): 525-533.
- [8] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004.
ZHANG J T. The methods of Vegetation Quantitative ecology[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2004.
- [9] 陶冶, 刘彤. 天山-阿尔泰山拟南芥种群分布与环境的关系[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 449-459.
TAO Ye, LIU Tong. Relationships between *Arabidopsis thaliana* Populations Distribution and Environmental Factors in the Tianshan-Altay Mountain Region, China[J]. *PROGRESS IN GEOGRAPHY*, 2009, 28(3): 449-459.
- [10] Kajsja Appelgren, Johanna Mattila. Variation in vegetation communities in shallow bays of the northern Baltic Sea[J]. *Aquatic Botany*, 2005, 83(1): 1-13.
- [11] GUIAN A, WEISS S B, WEISS A D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution[J]. *Plant Ecol*, 1999, 143: 107-122.
- [12] Zdravko Baruch. Vegetation-environment relationships and classification of the seasonal savannas in Venezuela[J]. *Ecology of Plants*, 2005, 200(1): 49-64.
- [13] 张江英, 周华荣, 高梅. 白杨河-艾里克湖湿地及周边植物群落与环境因子的关系[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 101-107.
ZHANG Jiangying, ZHOU Huarong, GAO Mei. Plant communities and their interrelations with environmental factors of wetlands and surrounding lands from Baiyang river to the Alice lake[J]. *Arid land geography*, 2007, 30(1): 101-107.
- [14] 周志强, 魏晓雪, 刘彤. 新疆奇台荒漠植物群落的数量分类及土壤环境解释[J]. *生物多样性*, 2007, 15(3): 264-270.
ZHOU Zhiqiang, WEI Xiaoxue, LIU Tong. The numerical classification of desert vegetation and soil interpretation in Qitai County, Xinjiang[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 264-270.
- [15] 刘康, 王效科, 杨帆, 等. 红花尔基地区沙地樟子松群落及其与环境关系研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(8): 858-862.
LIU Kang, WANG Xiaoke, YANG Fan, et al. Pines sylvesteris community on Honghuaerji sandy land and its relationship with environmental factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8): 858-862.
- [16] 郝占庆, 郭水良. 长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2000-2008.
HAO Zhanqing, GUO Shuilang. Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2000-2008.
- [17] 崔丽娟, Stephane Asselin. 湿地恢复手册—原则·技术与案例分析

- [M]. 中国建筑工业出版社, 2006.
- CUI Lijuan, Stephane Asselin. The wetland restoration handbook: guiding, principles and case studies[M]. China architecture and building press, 2006.
- [18] GUY C, JONATHAN G D. Flora of the Pro-Namib Desert Swakop River Catchment, Namibia: community classification and implications for desert vegetation sampling[J]. Journal of Arid Environments, 1997, 36(2): 271-290.
- [19] CARLO R. Additive partitioning of Rao's quadratic diversity: a hierarchical approach[J]. Ecological Modelling, 2005, 183: 365-371.
- [20] GAUCH H G. Multivariate analysis in community ecology Cambridge[M]. Cambridge University Press, 1982.
- [21] 李凯辉, 胡玉昆, 范永刚, 等. 环境因子对高寒草地植物群落分布和物种组成的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(4): 378-382.
- LI Kaihui, HU Yukun, FAN Yonggang, et al. Influence of Environmental Factors on Distribution of Plant Communities and Composition of Species in Alpine Grassland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4): 378-382.
- [22] ANKE H, STEPHAN R. Multivariate statistics as a tool for model-based prediction of floodplain vegetation and fauna[J]. Ecological Modelling, 2003, 169: 73-87.
- [23] DIELEMAN J A, MORTENSEN D A, BUHLER D D, et al. Identifying associations among site properties and weed species abundance I Multivariate analysis[J]. Weed Sci, 2000, 48: 567-575.
- [24] HELGE B, PIT U. Correspondence of the fine-scale spatial variation in soil chemistry and the herb layer vegetation in beech forests[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 210: 205-223.
- [25] 王晓春, 蔡体久, 谷金锋. 鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释[J]. 生态学报, 2007, 9: 3744-3751.
- WANG Xiaochun, CAI Tijiu, GU Jinfeng. Effects of soil properties on vegetation restoration in coal-gangue pile in Jixi area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 9: 3744-3751.
- [26] JAFARIA M, ZARE C M A, TAVILIB A, et al. Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran) [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 56: 627-641.
- [27] HOOKER, BURKE I, LAUENROTH W. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and opening in North America short grass steppe[J]. Plant Soil, 1991, 138: 247-256.
- [28] KENKEL N C, DERKSEN D A, THOMAS A G, et al. Review: Multivariate analysis in weed science research[J]. Weed Science, 2002, 50: 281-292.
- [29] 上官铁梁, 贾志力, 张金屯, 等. 汾河太原段河漫滩草地植被的数量分类与排序[J]. 草业学报, 2001, 10(4): 31-39.
- SHANG Guan Tieliang, JIA Zhili, ZHANG Jintun, et al. A study on the numerical classification and ordination of grassland vegetation in flood plain of the Fen river in Taiyuan[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2001, 10(4): 31-39.

Spatial distribution of vegetation and soil interpretation in the process of wetland restoration with the type of Sand-mining land

LI Wei, CUI Lijuan^{*}, ZHAO Xinsheng, ZHANG Manyin,
WANG Yifei, ZHAO Yuhui, ZHANG Yan, LI Shengnan

Research Institute of wetland, Chinese Academy of Forestry/Wetland Research Centre, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: The structures and types of plant communities of sand-mining land deteriorating wetland in Xi zhuojiaing were analyzed by the methods of TWINSpan and CCA ordination. The distribution pattern and its impact factors were discussed. The results showed that 40 species of 38 samples were divided into seven formations which can be described as follows: *Zizania latifolia*+*Eleocharis congesta*, *Hemarthria sibirica*+*Inula japonica*+*Artemisia lavandulifolia*+*Juncus turczaninowii*+*Artemisia capillaris*+*Scirpus planiculmis*, *Lythrum salicaria*+*Herba Sonchi Brachyoti*+*Typha minima*, *Juncus turczaninowii*+*Equisetum arvense*+*Polygonum lapathifolium*+*Phragmites australis*, *Eleocharis congesta* +*Scirpus planiculmis* Fr.Schmidt+*Artemisia capillaris*+*Artemisia lavandulifolia*, *Bidens pilosa*+*Setaria viridis*+*Typha orientalis* and *Potentilla supine*+*Salsola collina*+*Cephalanoplos setosum*+*Echinochloa crusgalli*. Plant species and soil factors in CCA analysis showed that *Leonurus japonicus*, *Plantago major* and *Salsola collina* were mainly affected by pH, *Zizania latifolia* mainly was affected by NH₄-N and soil organic matter(SOM), *Digitaria sanguinalis* and *Kummerowia striata* were mainly affected by TN and Mg²⁺, *Eleocharis congesta* and *Bidens tripartita* were mainly affected by K⁺, *Sonchus oleraceus*, *Herba Sonchi Brachyoti* and *Hemarthria sibirica* were mainly affected by Na⁺, *Melilotus officinalis* was mainly affected by Cl⁻, *Chenopodium glaucum*, *Cephalanoplos setosum* and *Cyperus globosus* were mainly affected by NO₃⁻, *Scirpus planiculmis* and *Typha minima* were mainly affected by TP and soil moisture. The results of this study would provide scientific support for sand-mining wetlands restoration.

Key words: wetlands restoration; two way indicator species analysis; canonical correspondence analysis; soil