J. Lake Sci.(湖泊科学), 2017, **29**(2): 409-419
DOI 10.18307/2017.0217
© 2017 by *Journal of Lake Sciences*

新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落空间分布与环境解释*

徐　娜[1], 姚艳玲[2], 王　铭[1,3], 王升忠[1,3**], 曹议文[1], 徐志伟[1,3], 李鸿凯[1,3], 董彦民[1]
(1:东北师范大学泥炭沼泽资源研究所, 长春 130024)
(2:松辽流域水资源保护局松辽水环境科学研究所, 长春 130024)
(3:东北师范大学国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024)

摘　要: 为探明巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落与环境因子的关系, 采用样线与样方结合的方法, 于2014－2015年在天鹅湖沼泽湿地进行植物群落调查与环境因子测定. 结果显示, 巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地植物共有35种, 隶属于19科27属. 方差分析表明, 地表积水条件显著影响植物群落物种多样性, 随着地表积水减少, 物种丰富度和Shannon-Wiener指数呈现上升趋势, Pielou指数呈现下降趋势, 说明随着地表积水的减少, 植物群落的物种多样性逐渐增加. 冗余分析与偏冗余分析表明, 所有环境因子共解释了植物群落物种组成变异的67.9%. 水位与土壤全氮含量对物种组成的总效应达到显著水平, 土壤全氮含量的净效应达到极显著水平, 但全磷含量和有机碳含量的总效应与净效应均未达到显著水平. 研究表明, 积水条件和土壤氮含量是巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地植物群落物种组成和分布的主要环境驱动因子.
关键词: 植物群落;高寒沼泽湿地;环境因子;物种组成;巴音布鲁克

Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in Xinjiang Bayanbulak marsh

XU Na[1], YAO Yanling[2], WANG Ming[1,3], WANG Shengzhong[1,3**], CAO Yiwen[1], XU Zhiwei[1,3], LI Hongkai[1,3] & DONG Yanmin[1]
(1: *Institute for Peat and Mire Research, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *P.R.China*)
(2: *Songliao Institute of Water Environmental Science, Songliao River Basin Water Resources Protection Bureau, Changchun* 130024, *P.R.China*)
(3: *Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration of National Environmental Protection, Changchun* 130024, *P.R.China*)

Abstract: In order to explore the relationships between the vegetation and environmental factors in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland, vegetation survey was conducted and environmental factors, including water table (WT), total nitrogen content (TN), soil organic carbon(SOC), and total phosphorus (TP), were measured in 2014 and 2015. The results showed that a total of 35 plant species belonging to 19 families and 27 genera were identified in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland. One-way ANOVA revealed that species composition and richness were significantly affected by the surface water level. Species richness and Shannon-Wiener index increased, and the Pielou index decreased with the decreasing of surface water level. The RDA and partial RDA analyses revealed that four environmental variables totally explained 67.9% of total variations in species composition, of which the gross effects of WT and TN on species composition were significant and the net effect of TN was also significant. However, the gross and net effects of SOC and TP was not significant. Overall, our results indicate that WT and TN are two important determinants of the vegetation composition and its distribution in Bayanbulak Swan Lake alpine wetland.
Keywords: Plant community; alpine wetland; environment factors; species composition; Bayanbulak

---

* 环保公益性行业科研专项(201309041)、国家自然科学基金项目(41501090)和科技部基础性工作专项(201113207)联合资助. 2016－04－06收稿;2016－07－01收修改稿. 徐娜(1989～), 女, 硕士研究生;E-mail: xun792@nenu.edu.cn.
** 通信作者; E-mail: szwang@nenu.edu.cn.

湿地植物作为主要初级生产者,是湿地生物组分中最活跃的部分,也是湿地生态系统的重要组成部分,对湿地生态系统结构的维持和生态服务功能的发挥具有重要的支撑作用[1]. 植物群落是植物与环境相互作用的产物,其结构、功能和生态特征综合反映了湿地生态环境的基本特点和功能特性[2]. 大尺度上,气候对植物群落种类组成、空间分布起着决定性作用;小尺度上,地形、土壤、生物之间的相互作用等因素也影响着植物群落的组成及分布[3-5]. 沼泽湿地中环境条件变化是植物物种组成调节的主要驱动力,植物为适应环境的不断变化而使得最有竞争力的物种占据优势[6]. 因此,植物群落种类组成、空间分布及其与环境因子的关系一直是生态学研究的热点问题. 已有研究表明,水文条件和土壤环境是影响植物群落物种组成和分布的关键环境因子,水文条件变化对湿地生态系统的结构和特征具有明显的调控作用,直接影响植物的生长发育、竞争关系、植物群落的物种组成和优势度[7-8]. 而湿地土壤环境则为植物的生存繁殖提供必需的营养物质环境基础,影响植物的种类、数量、形态和分布[9]. 而不同的湿地类型,对植物群落多样性起主导作用的环境因子也不同. 在沿海湿地,水分和盐分被认为植物群落多样性的主要因素[10]. 在湖泊湿地,地下水位和土壤有机质是影响植物群落分布的关键环境因子[11]. 目前,针对不同湿地类型开展的环境因子对植物群落影响的研究相对较少,而了解环境因素对植物群落种类组成、分布的影响,不但有利于揭示群落结构和物种多样性分布格局以及进一步了解植物群落的生态过程,对发展和优化物种多样性保护策略、可持续管理和利用植物资源也具有重要的指导意义.

高寒沼泽是一类具有独特生态环境功能和保护价值的湿地生态系统,承接和调节着高原的冰雪融水、地表径流和河流水量,具有独特的水文和生态功能,对维持高海拔地区特殊生境和生物多样性具有重要意义[12]. 位于我国西北干旱区的巴音布鲁克高寒沼泽湿地是新疆较大的高寒湿地之一,也是开都河、伊犁河、玛纳斯河等诸多天山南北河流的源头,其独特的地理与生态区位使得巴音布鲁克高寒沼泽湿地成为维系我国西北干旱地区流域生态环境安全的重要屏障. 目前,巴音布鲁克高寒沼泽湿地已开展了湿地鸟类[13-14]、湿地土壤碳库与碳循环[15-16]、地表水环境及水循环[17]以及湿地植被的分布与退化过程[18-19]等方面的相关研究. 然而,巴音布鲁克沼泽湿地物种多样性及其主要环境影响因素尚不清楚. 本文以新疆巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地为研究对象,开展沼泽湿地主要植物群落及其水文和土壤环境因子调查,对植物群落物种多样性及其环境之间的关系进行分析,并定量分离各类因素对植物群落空间分布的解释能力,为深入探讨环境梯度下不同植物的分布、环境特征及生产力状况奠定基础,也为高寒沼泽湿地的保护管理及可持续发展提供重要依据.

1 研究区概况

巴音布鲁克天鹅湖湿地(42°45′~43°0′N,82°30′~84°35′E)位于新疆维吾尔族自治区巴音郭楞自治州和静县西北,天山南麓,大尤尔都斯盆地,是巴音布鲁克沼泽湿地的重要组成部分. 海拔 2300~2700 m,气候属温带大陆性干旱气候,冬长无夏,年平均气温为-4.6℃,年降水量为 273 mm,年蒸发量为 1250 mm,年平均相对湿度为 60%[16]. 湿地水源靠冰雪融水和地下水溢出补给,地下水埋深较浅甚至出露,为开都河、孔雀河的源流区. 充沛的水源补给形成了星罗棋布的湖泊以及大面积的沼泽. 该地区沼泽湿地可分为水沼泽草甸和丘状沼泽草甸,主要植被类型为一年及多年生草本组成的沼泽或沼泽草甸.

2 研究方法与数据处理

2.1 样地设置

于 2013 年在天鹅湖湿地布设多个 PVC 水位监测管,经过连续 3 年的水位监测,依据各样点水位变化及水位的稳定程度,将研究区沼泽湿地分为临时性积水区、季节性积水区和常年性积水区. 其中临时性积水区分布在研究区的外缘,地势较高,仅在集中降雨后地表有临时积水且会迅速下渗或通过地表径流排走,地表无长时间积水状况;季节性积水区为在生长季降雨集中的月份地表有积水,但地表积水不稳定,可在干季出现无积水现象;常年性积水区分布在研究区的内部,地势较低,水源补给包括地下水、地表径流和大气降水,地表在整个生长季均有积水,且积水环境稳定. 根据研究区不同积水区的分布及积水条件,布设两条植物群落调查样线,每条样线均涵盖临时积水区、季节性积水区和常年性积水区 3 种类型. 第一条样线设置为 B

线,共有 6 个样点,B1~B6 点水位逐渐升高;第二条样线设置为 D 线,共有 5 个样点,D1~D5 点水位逐渐升高(图 1).

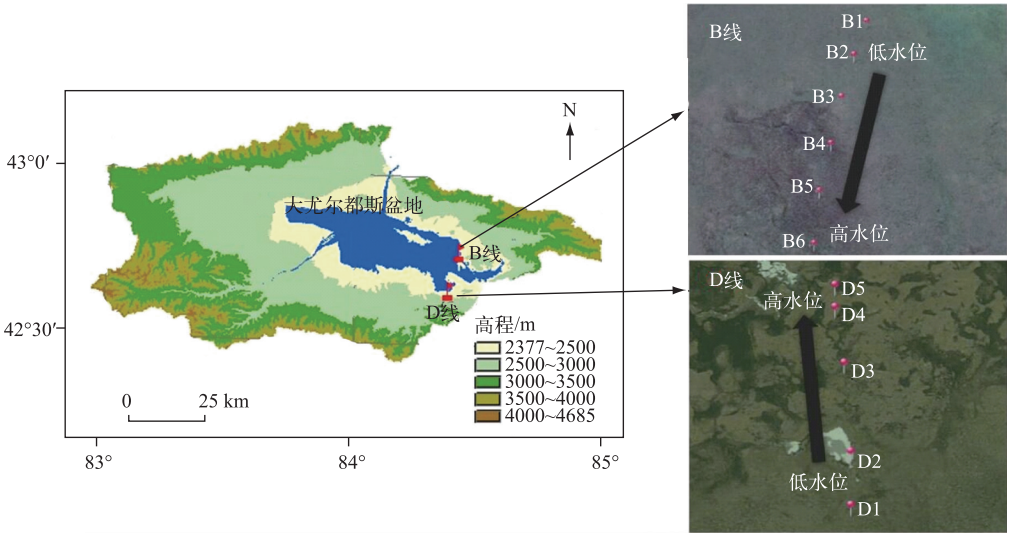


图 1 巴音布鲁克高寒沼泽调查样线分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Bayanbulak marsh

2.2 植物群落及环境因素的调查及分析

在研究区每个样点处布设 6 个植物调查样方(1 m×1 m),共 66 个调查样方. 为保证植物物种的丰富度和植物种类的准确辨别,于 2014 年 7 月和 2015 年 8 月 2 次在植物的花期或抽穗期进行植物多样性调查,并同时记录样方内的植物种类、植株数目、高度、盖度等数据. 选取地表水位(WT)、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)4 个环境因子分析水文和土壤环境对植物群落多样性的影响. 其中每个样点的地表水位数据选用 2014－2015 年的监测数据.

由于土壤中 SOC、TN 和 TP 含量在年际间相对稳定,因此仅在 2014 年 7 月在每个样点处采用土钻采集 3 个 0~15 cm 的土壤样品,自然风干后测定 SOC、TN 和 TP 含量. SOC 含量采用重铬酸钾加热氧化法测定,TN 含量采用凯氏定氮法测定,TP 含量采用钼蓝比色法测定[20]. 为了避免假重复,本研究将每个样点的数据取平均值. 对于不同积水条件沼泽类型物种多样性的差异比较,将不同沼泽类型所包含的样点数据取其均值后再进行分析.

2.3 数据分析

巴音布鲁克天鹅湖沼泽植物群落均为草本,为了避免单一指数对多样性测定造成的不足,本文选取群落各物种在样方中的相对重要值(IV)、物种丰富度指数(S, 样方中出现的物种数)、Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(E)、Simpson 优势度指数(D)来研究该区的群落多样性特征, 各指数计算方法分别为:

$$IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度})/3 \tag{1}$$

$$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i \tag{2}$$

$$E = H'/\ln S \tag{3}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{4}$$

式中,S 为样方中观察的物种数;$P_i = N_i/N$,P_i为样方中第 i 个物种的相对重要值,其中 N 为样方中各物种重要值总和,N_i为第 i 个种的重要值.

采用 Canoco 4.5 软件分析群落物种重要值与环境变量的关系. 在进行排序分析之前,首先对物种矩阵

做除趋势对应分析(detrended correspondence analysis,DCA),结果显示,所有排序的最长轴长度小于3,因此适合选用冗余分析(RDA)排序方法. 考虑到环境因子的多样性可能导致排序结果的不可靠,在进行RDA分析前,计算了环境因子的膨胀系数(inflation factors,IFs). 结果表明,所有环境因子的膨胀系数均小于10,说明环境因子间的共线性十分微弱,可以不予考虑. 同时为了最小化稀有物种对结果的影响,分析前删除了出现在样方数少于3个的物种[21].

为了评估各个环境因子对群落物种组成影响的相对重要性,分别计算每个环境因子的总效应和净效应. 一个环境因子的总效应是指仅以1个环境因子为解释变量,进行RDA排序时物种组成变异的解释量,而其净效应是指以1个环境因子进行partial RDA分析时物种组成变异的解释量[22]. 所有排序的显著性均由MonteCarlo随机置换(499次)检验进行检验. 为了最小化稀有物种对排序结果的影响,对所有排序都执行了稀有物种的降权处理. 最后用CanocoDraw绘制RDA排序图.

不同积水条件下,植物群落多样性的差异性使用单因素方差分析法(One-way ANOVA)来进行分析,Duncan多重比较进行检验. 通过个案K-S检验和方差的同质性检验,不同积水状况下群落多样性指数数据服从正态分布,方差齐次($P>0.05$). 单因素方差分析使用SPSS 20.0软件辅以Excel 2010实现,绘图使用Origin 8.0完成.

3 研究结果

3.1 巴音布鲁克沼泽湿地植物群落物种多样性特征

本次调查中共记录植物35种,隶属于19科27属(表1). 有3种植物只出现在1~2个样方中,出现频率很低,占植物物种总数的17.95%. 细果苔草和黑花苔草在调查样方中出现的频率最高,出现样方数占总样方数的比例达80.65%,表明这2种植物生态适应能力强,分布幅度较宽. 其次是海韭菜、线叶嵩草,出现样方数分别占总样方数的58.06%和51.61%.

根据样线上各样点样方内植物重要值的大小共划分了6种主要植物群落类型,分布于3种不同积水状况下. 临时性积水区,主要植物群落有细果苔草-线叶嵩草群落、细果苔草-木贼群落. 季节性积水区,主要植物群落有细果苔草-黑花苔草-海韭菜群落、细果苔草-黑花苔草-水麦冬群落、细果苔草-黑花苔草群落. 常年性积水区,主要植物群落有单行苔草-大穗苔草群落. 每种群落的伴生种及其所处环境的地表积水状况见表2.

3.2 不同积水条件下植物群落物种多样性

单因素方差分析结果表明,巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地不同地表积水条件的植物物种数呈极显著差异($P<0.01$),Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数呈显著差异($P<0.05$),但随着积水条件的变化,Simpson优势度指数并未表现出明显的变化趋势($P>0.05$). 多重比较分析表明,不同地表积水条件的物种丰富度指数和Shannon-Wiener指数有相同的变化趋势,即:常年积水区<季节性积水区<无积水区. 随着地表积水的增加,均匀度指数呈增加的趋势,优势度指数没有明显的变化趋势(图2). 说明随着地表积水的增加,巴音布鲁克天鹅湖湿地植物的种类逐渐减少,群落结构趋于简化,多样性降低.

3.3 环境因子与RDA排序的相关

对11个样点的植物群落物种与环境因子进行RDA排序分析,并运用蒙特卡洛检验(Monte Carlo test)检验排序轴特征值的显著性,置换次数为499. 结果表明,所有排序轴都特征值是极显著的($P<0.01$);前4个排序轴的特征值分别为0.461、0.152、0.041和0.025,合计占总特征值的67.9%;物种组成累积解释量和物种-环境关系累积解释量分别达67.9%和100%,说明排序效果良好. 水位与RDA第一轴存在显著正相关($P<0.05$),SOC、TN含量与第二轴呈极显著负相关($P<0.01$)(表3). 环境因子的空间分布较好地指示了植物群落物种的组成和分布. 说明水分与土壤氮磷养分对天鹅湖湿地植物群落物种组成及分布影响显著.

3.4 植物群落与环境因子的关系

植物群落物种与环境因子排序图(图3)表明环境条件对植物群落物种分布的影响. 箭头连线长度表示环境因子与群落物种分布相关程度的大小. 箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性大小,夹角越小,表示相关性越高. 箭头所指方向表示该环境因子的变化趋势.

表 1 巴音布鲁克巴音布鲁克天鹅湖沼泽植物种类

Tab.1 The plants in the Bayanbulak Swan lake wetland

代码	植物种类	拉丁名	科	属
S1	黑花苔草	*Carex melanantha*	莎草科	苔草属
S2	细果苔草	*Carex microglochn*	莎草科	苔草属
S3	单行苔草	*Carex microglochn*	莎草科	苔草属
S4	线叶嵩草	*Kobresia capillifolia*	莎草科	嵩草属
S5	海韭菜	*Triglochin maritimum*	水麦冬科	水麦冬属
S6	宽苞韭	*Allium platyspathum*	百合科	葱属
S7	早熟禾	*Poa annua*	禾本科	早熟禾属
S8	野黑麦	*Hordeum brevisublatum*	禾本科	黑麦属
S9	木贼	*Equisetum hyemale*	木贼科	木贼属
S10	莲座蓟	*Cirsium esculentum*	菊科	蓟属
S11	梅花草	*Parnassia palustri*	虎耳草科	梅花草属
S12	小米草	*Euphrasia pectinata*	玄参科	小米草属
S13	天山报春	*Primula nutans*	天山报春科	天山报春属
S14	拟鼻花马先蒿	*Pedicularisrhinanthoides*	玄参科	马先蒿属
S15	海乳草	*Glaux maritima*	报春花科	海乳草属
S16	毛茛	*Ranunculus japonicus*	禾本科	毛茛属
S17	暗褐苔草	*Carex atrofusca*	莎草科	苔草属
S18	宽叶红门兰	*Orchis latifolia*	兰科	红门兰属
S19	野胡萝卜	*Daucus carota*	伞形科	胡萝卜属
S20	长叶碱毛茛	*Halerpestes ruthenica*	毛茛科	毛茛属
S21	委陵菜	*Potentilla discolor*	蔷薇科	委陵菜属
S22	珠芽蓼	*Polygonum viviparum*	蓼科	蓼属
S23	火绒草	*Lobularia maritima*	菊科	火绒草属
S24	狸藻	*Utricularia vulgaris*	狸藻科	狸藻属
S25	天山龙胆	*Gentiana macrophylla*	龙胆科	龙胆属
S26	风毛菊	*Saussurea japonica*	菊科	风毛菊属
S27	河边龙胆	*Gentiana riparia*	龙胆科	龙胆属
S28	水麦冬	*Triglochin palustre*	水麦冬科	水麦冬属
S29	大穗苔草	*Carex rhynchophysa*	莎草科	苔草属
S30	蓍草	*Achillea millefolium*	菊科	蓍属
S31	肋柱花	*Lomatogonium rotatum*	龙胆科	肋柱花
S32	杉叶藻	*Hippuris vulgaris*	杉叶藻科	杉叶藻属
S33	裂叶毛茛	*Halerpestes tricuspis*	毛茛科	毛茛属
S34	狐尾藻	*Myriophyllum verticillatum*	小二仙草科	狐尾藻属
S35	扁蕾	*Gentianopsis barbata*	龙胆科	扁蕾属

图 3a 显示植物群落与环境因子的排序,由环境因子与 RDA 排序的相关性可知,RDA 排序第一轴反映水位变化. 沿着轴 1 方向,细果苔草+线叶嵩草群落、细果苔草+黑花苔草群落+海韭菜群落、细果苔草+木贼群落、细果苔草+黑花苔草群落、细果苔草+黑花苔草+水麦冬、大穗苔草+单行苔草群落按水位梯度分布,分布状况与地表积水状况吻合. RDA 排序第二轴反映土壤 TN 含量、SOC 含量变化. 沿着轴 2 方向,细果苔草+黑花苔草+水麦冬群落、单行苔草+大穗苔草群落、细果苔草+黑花苔草+海韭菜群落、细果苔草+线叶嵩草群落、细果苔草+黑花苔草、大穗苔草+单行苔草群落、细果苔草+木贼群落沿着 TN 含量、SOC 含量梯度降低的方向分布.

表 2 巴音布鲁克天鹅湖沼泽主要植被群落类型

Tab.2 The main plant community types in the Bayanbulak Swan Lake wetland

点位	植物群落	主要伴生种	地表积水状况	水位/cm
B1	细果苔草+线叶嵩草	黑花苔草、暗褐苔草、海韭菜、木贼、莲座蓟	临时性积水	−5.0
B2	细果苔草+黑花苔草+海韭菜	木贼、线叶嵩草、拟鼻花马先蒿、小米草	季节性积水	0
B3	细果苔草+海韭菜+黑花苔草	线叶嵩草、拟鼻花马先蒿、小米草、狸藻	季节性积水	1.2
B4	细果苔草+黑花苔草+海韭菜	线叶嵩草、小米草、拟鼻花马先蒿、莲座蓟、狸藻	季节性积水	2.0
B5	细果苔草+黑花苔草+水麦冬	线叶嵩草、海韭菜、狸藻、天山报春、小米草等	季节性积水	3.4
B6	单行苔草+大穗苔草	黑花苔草、海韭菜、细果苔草、水麦冬、拟鼻花马先蒿	常年性积水	4.5
D1	细果苔草+木贼	线叶嵩草、黑花苔草、暗褐苔草、海韭菜、火绒草	临时性积水	−15.0
D2	细果苔草+黑花苔草	线叶嵩草、小米草、珠芽蓼、木贼、天山报春、海韭菜	季节性积水	1.2
D3	细果苔草+黑花苔草	单行苔草、拟鼻花马先蒿、线叶嵩草、水麦冬、梅花草、狸藻等	季节性积水	2.6
D4	大穗苔草+单行苔草	黑花苔草、细果苔草、水麦冬、狸藻等	常年性积水	4.0
D5	大穗苔草+单行苔草	细果苔草、杉叶藻、狐尾藻、狸藻	常年性积水	6.0

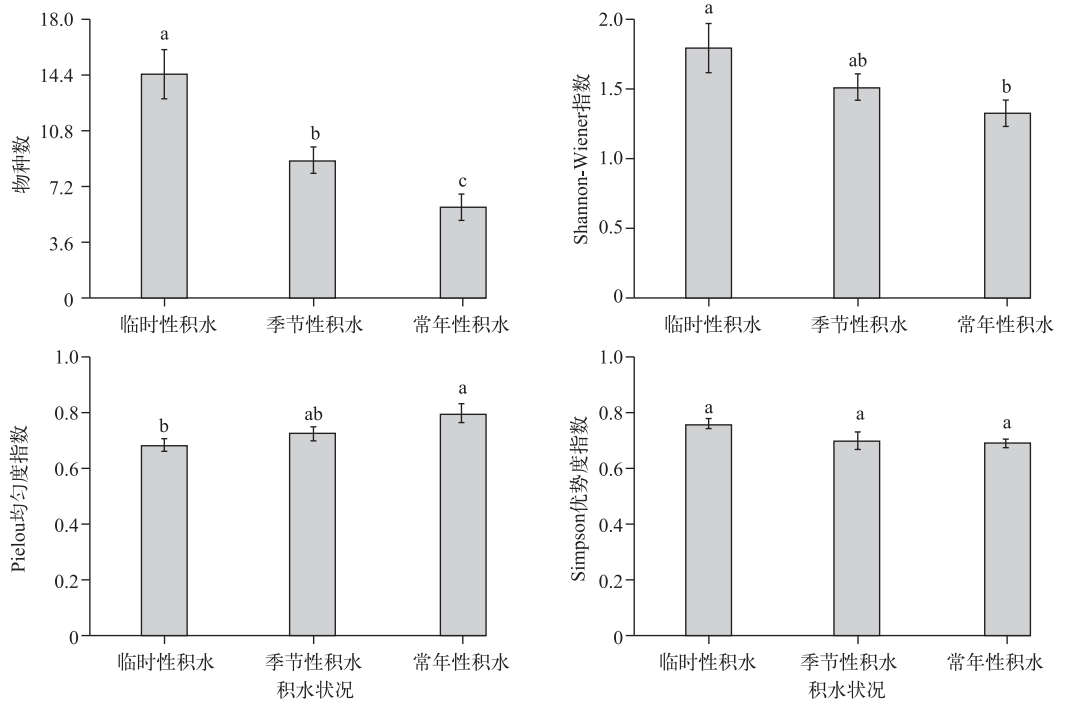


图 2 不同地表积水状况植物群落物种多样性

Fig.2 The diversity index of plant community in different surface water regime

更多的物种分布在水位较低或者氮养分含量高的生境(图 3b),这说明积水区土壤的通气条件较差,只有一部分耐水淹胁迫种的竞争力上升,导致水位高的生境植物多样性降低. 此外,还说明研究区较多物种对氮元素的需求高于碳、磷元素,其分布受氮养分限制.

Monte Carlo 随机置换检验表明,4 个环境因子中 WT 和 TN 含量对物种组成的总效应达到显著水平. 净效应只有 TN 含量达到显著水平,而 SOC 含量、土壤 TP 含量的总效应和净效应均未能显著解释物种的组成(表 4).

表 3 环境因子与 RDA 前 4 个排序轴的相关系数及排序摘要

Tab.3 Correlation coefficients between environmental variables and the first four RDA ordination axes and ordination summary

	环境因子及排序概要	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴
环境因子	水位	0.629*	−0.556	−0.060	−0.530
	SOC	0.214	−0.899**	0.368	0.107
	土壤 TN	−0.468	−0.860**	−0.114	0.166
	土壤 TP	0.391	−0.446	−0.312	0.742**
RDA 排序概要	特征值	0.461	0.152	0.041	0.025
	物种−环境因子相关	0.921	0.916	0.871	0.776
	解释的物种组成变异的累积百分比	46.1	61.3	65.4	67.9
	物种−环境因子关系方差的累积百分比	67.9	90.2	96.3	100.0
	所有典范轴的显著性测验	F = 3.169	P = 0.0080		

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

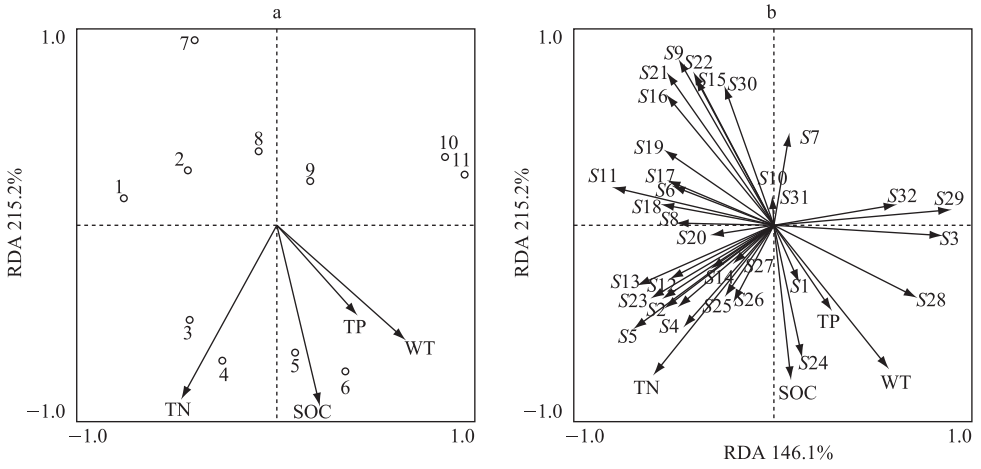


图 3 植物群落(a)和物种(b)与环境因子的排序图

(图 3a 中数字 1~6 表示 BY1~BY6 样点的植物群落,数字 7~11 表示 D1~D5 样点的植物群落, 代码 S1~S32 具体植物种类详见表 1)

Fig.3 RDA biplot between environment factors and plant communities(a),species(b)

表 4 环境因子对物种组成的总效应和净效应

Tab.4 Gross and net effects of environmental variables on species composition

环境因子	总效应	F	净效应	F
水位	0.24	2.81*	0.10	1.94
SOC	0.15	1.58	0.05	0.97
土壤 TN	0.22	2.46*	0.22	4.10**
土壤 TP	0.12	1.21	0.12	0.072

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

4 结论与讨论

4.1 水位对沼泽湿地植物群落多样性的影响

水是生态系统中重要的生态因子,水位变化对植物群落的物种组成、分布具有显著影响,甚至起着决定

性作用[23]. 已有研究表明,水位与群落多样性之间存在显著相关性,水分胁迫首先使植物在生理水平上产生适应性调整,通过形态构建表现出来,使植物种群数量特征改变,最终导致植被分布格局的改变[24]. 本研究中,RDA 排序分析结果显示,地表水位对物种组成变异解释的贡献率高达 46.1%. 随着水位梯度的降低,群落物种数减少,且在不同水文条件下,群落多样性表现出显著差异. 大量研究表明,淹水导致群落物种多样性的降低,尤其是物种丰富度的降低[25-26]. 本研究中也发现,随着地表积水的减少,物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数均表现出上升趋势. 产生该现象的原因主要是随着水位波动幅度增大,淹水时间相继超过一些植物极端耐受限度,使土壤中一些种子无法经受极端淹水条件而消亡,导致种子库组成及分布格局发生改变[27],从而影响群落物种的组成. 此外,长期积水环境使得土壤的通气条件变差,超过某些植物的耐受范围,导致其死亡,植物群落向单优物种群落发展[28]. 植物物种组成数量减少,分布不均匀,从而物种丰富度与多样性降低. 本研究中,Pielou 指数对水文条件变化的响应趋势与物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数相反. 随着地表积水增加,Pielou 指数呈升高趋势,这可能是由于淹水对优势种优势度的胁迫强于其对物种生存的胁迫,同时在一定程度上也反映了湿地植物的水分生态幅较宽[29].

然而,不同研究中湿地植物群落多样性对水文变化的响应规律存在不同程度的差异. 在莫莫格湿地,季节性积水区的物种丰富度和群落密度高于常年积水和无积水区[30]. 在三江平原沼泽湿地,随着水位梯度的增加,物种丰富度下降,而 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数及 Pielou 指数升高[31]. 在若尔盖高寒沼泽湿地,不同地表水位下,植物群落的 Shannon-Wiener 指数、Simposon 指数和物种丰富度指数有显著差异,Pielou 指数没有显著差异[32]. 这些差异的产生有两方面原因,首先不同地域的湿地水文情势开始的时间不同,影响也不同,这在植物群落多样性指数于生长季内呈波动变化上有所体现[33]. 其次,水位动态变化对湿地植物生长及群落组成存在不同程度的影响,如地表积水状态的稳定性和持续的时间将直接影响植物群落的物种组成[7]. 因此,在分析植物群落物种多样性与水文条件关系时,要特别注意研究区的水分状况是长期稳态还是处于调查期临近的短期降水引起的临时水文条件变化.

4.2 高寒沼泽湿地植物群落多样性与土壤养分的关系

土壤的异质性可以降低不同植物对资源的竞争,提高群落的物种多样性,同时植物对不同养分条件的需求或偏好必然影响到个体或种群在群落中的分布,这是植物共存的基础[34]. 湿地土壤中碳、氮、磷元素是湿地生态系统中极其重要的生态因子,其中碳元素对气候变化较敏感,可以用于指示沼泽湿地对气候变化的响应,氮和磷是植物生长所必需的矿物质营养元素和生态系统中最常见的限制性养分[35-36]. 因此,这 3 种元素的变化能够很好地指示土壤的养分状况. 本文研究结果表明,TN 含量对物种组成的总效应和净效应达到显著水平,且与 RDA2 轴呈显著负相关,说明天鹅湖沼泽湿地群落物种组成及分布受氮养分的限制. 本研究中 TN 含量范围为 0.070%~0.197%,远低于若尔盖高寒沼泽湿地 TN 含量(0.36%~0.54%)[37],这表明天鹅湖湿地沼泽土壤中氮养分较缺乏. 随着氮含量的增加,更多物种能存活,物种丰富度增加. SOC 含量(24.26%~40.90%)与 RDA2 轴呈显著负相关,但对物种组成的总效应和净效应均未达到显著水平,这可能是因为植物对碳养分的需求低于氮养分. 而土壤中磷元素较稳定,相对难溶,尤其在酸性环境中更加难溶[38]. 本研究中 TP 含量较低(0.044%~0.085%),且土壤呈酸性[37,39],导致磷元素被植物吸收的量很少. 因此,SOC 与 TP 含量均不是限制植物生长的主要土壤养分因素.

4.3 环境因素对植物群落的相对重要性

用于解释物种组成和分布的环境因子之间往往产生复杂的相互作用,这使得不同环境因子对物种组成和分布的解释存在叠加效应[40]. 根据本研究的结果,水位对物种组成变异的总效应为 24%,达到显著水平,混合解释能力较强,但净效应只有 10%,未达到显著水平. 土壤养分对物种组成变异的总效应为 57.5%,达到显著水平($P<0.05$),但其中只有全氮含量的总效应($P<0.05$)和净效应($P<0.01$)均达到显著水平. 出现这一结果的原因可能是沼泽湿地的水文条件与土壤养分间相互作用,水文变动影响了土壤养分循环的物理化学过程[41],从而共同影响植物群落的物种组成.

本研究中,4 种环境因子共解释了巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地植物群落物种组成的 67.9%,这说明环境因子可以解释植物群落的大部分变异. 已有研究表明,环境因素对植被变化的可解释程度主要是由植被本身的复杂性决定的,植被类型越简单,环境对其的可控性越大,可解释程度就越高[4]. 闽江上游干旱河谷植

物群落的研究发现,灌木层有 38 个物种,草本层有 41 个物种,环境因素解释了灌丛群落变化的 21.47%[42]. 太白山高山植被研究中,灌木层有 5 个物种,草本层有 77 个物种,环境因子解释了物种组成变异的 31.7%[43]. 而若尔盖沼泽草甸植被均为草本,物种数目为 151,但是植物群落结构较为简单,环境因子对其群落物种组成的解释量高达 77.1%[32]. 巴音布鲁克沼泽湿地与若尔盖沼泽草甸植物群落类似,全部为草本植物,植被组成相对简单,因此,环境因素对物种组成及分布的可解释程度较大. 也说明随着植被复杂性降低,环境因子对植物群落变化的主导性能力增强.

可见,水位条件和土壤 TN 含量是影响巴音布鲁克天鹅湖沼泽湿地植物群落物种多样性的关键因子,地表积水越深,植物群落物种组成越简单;TN 含量越高,物种多样性越高. 因此,全球气候变化和人类活动引起的水资源格局和氮沉降过程变化可能引起巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落物种组成与分布的变化. 而天鹅湖沼泽湿地是中国唯一的天鹅国家级自然保护区,每年均有大天鹅(*Cygnus cygnus*)、小天鹅(*C. columbianus*)、疣鼻天鹅(*C. olor*)和燕鸥(*Sternahirundo longipene*)等珍禽陆续从南方迁徙到这里繁衍生息. 而已有研究表明,由于天鹅湖沼泽湿地比草地的植被高度更高,更靠近水源,更有利于大天鹅等进行隐蔽和取食. 因此,该区域的沼泽湿地是大天鹅等珍禽最主要的栖息地和繁育地[14]. 在天鹅湖沼泽湿地中,虽然常年积水区拥有较低的物种多样性,但相对于临时积水区和季节性积水区,常年积水区的水文环境和植物群落结构处于更加稳定的状态,且最不易受到外界干扰,因此是最适宜的珍稀鸟类栖息地. 因此,根据本文的研究结果,鉴于天鹅湖沼泽湿地作为珍惜鸟类栖息地的重要性,建议该地区合理利用当地水资源,控制放牧等人类活动对湿地水环境和土壤养分环境的干扰,控制沼泽湿地临时积水区的面积,扩大或维持常年积水区沼泽面积,以维持大天鹅等珍禽的栖息地和觅食生境.

5 参考文献

[1] Wang Xuehong, Li Yunzhao, Meng Huan *et al*. Distribution pattern of plant community in new-born coastal wetland in the Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(8): 1021-1025. [王雪宏, 栗云召, 孟焕等. 黄河三角洲新生湿地植物群落分布格局. 地理科学, 2015, **35**(8): 1021-1025.]

[2] Yan Changzhou, Jin Xiangcan, Zhao Jingzhu *et al*. Ecological restoration and reconstruction of degraded lakeside zone ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(2): 360-364. [颜昌宙, 金相灿, 赵景柱等. 湖滨带退化生态系统的恢复与重建. 应用生态学报, 2005, **16**(2): 360-364.]

[3] Niu Jianming. Relationship between main vegetation types and climatic factors in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(1): 47-52. [牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究. 应用生态学报, 2000, **11**(1): 47-52.]

[4] Shen Zehao, Zhang Xinshi. The spatial pattern and topographic interpretation of the forest vegetation at Dalaoling region in the Three Gorges. *Acta Botanica Sinica*, 2000, **42**(10): 1089-1095. [沈泽昊, 张新时. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 2000, **42**(10): 1089-1095.]

[5] He Qiang, Cui Baoshan, Zhao Xinsheng *et al*. Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(2): 676-687. [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. 生态学报, 2009, **29**(2): 676-687.]

[6] Whigham D, Verhoeven JT. Wetlands of the world: The next installment. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, **17**: 167. DOI: 10.1007/s11273-009-9133-y.

[7] Yang Jiao, Li Enhua, Cai Xiaobin *et al*. Research progress in response of plants in wetlands to water level change. *Wetland Science*, 2014, **12**(5): 807-813. [杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌等. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. 湿地科学, 2014, **12**(5): 807-813.]

[8] Yao Xin, Yang Guishan, Wan Rongrong *et al*. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 813-821. DOI: 10.18307/2014.0601. [姚鑫, 杨桂山, 万荣荣等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 813-821.]

[9] Ling Min, Liu Ruhai, Wang Yan *et al*. Spatial heterogeneity of soil nutrients and the relationship between soil nutrients and plant community in Tamarix chinensis forest farm wetland of Yellow River delta wetland. *Wetland Science*, 2010, **8**(1): 92-97. [凌敏, 刘汝海, 王艳等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤养分的空间异质性及其与植物群落分布的耦

合关系. 湿地科学, 2010, **8**(1): 92-97.]

[10] Wang Qing, Wang Chenghuan, Huang Shenfa *et al*. Review on salt marsh plant communities: Distribution, succession and impact factors. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(2): 375-388. [王卿, 汪承焕, 黄沈发等. 盐沼植物群落研究进展: 分布、演替及影响因子. 生态环境学报, 2012, **21**(2): 375-388.]

[11] 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. *Arid Land Geography*, 2007, **30**(1): 101-107.[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. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 101-107.]

[12] Yang Yongxing. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research. *Progress in Geography*, 2002, **21**(2): 111-120.[杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展, 2002, **21**(2): 111-120.]

[13] Cai Dai, Ma Ming. Surveys on the population of whooper swans in Xinjiang Bayanbulak wetland. *Chinese Journal of Wildlife*, 1997, **2**: 11-13. [才代, 马鸣. 天山巴音布鲁克湿地大天鹅种群数量估算. 野生动物学报, 1997, **2**: 11-13.]

[14] Dong Chao, Zhang Guogang, Lu Jun *et al*. Habitat selection of whooper swan at Bayanbulak in Xinjiang of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(16): 4885-4891. DOI: 10.5846/stxb201211281690.[董超, 张国钢, 陆军等. 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择. 生态学报, 2013, **33**(16): 4885-4891.]

[15] Yang Lei, Jia Hongtao, Hu Yi *et al*. Impacts of water condition on CO_2 emissions in Bayinbuluke Marsh Meadow. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(2): 168-173. [杨磊, 贾宏涛, 胡毅等. 水分条件对巴音布鲁克高寒湿地 CO2 排放的影响. 草业科学, 2015, **32**(2): 168-173.]

[16] Li Lijun. The study of soil carbon pool and its stability in Swan lake alpine wetland[Dissertation]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. [李丽君. 天鹅湖高寒湿地生态系统土壤碳库及其稳定性研究[学位论文]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2013.]

[17] Yang Qing, Cui Caixia. Impact of climate change on the surface water in Bayanbuluk alpine-cold wetland in the Tianshan Mountainous. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(3): 397-403. [杨青, 崔彩霞. 气候变化对巴音布鲁克高寒湿地地表水的影响. 冰川冻土, 2005, **27**(3): 397-403.]

[18] Li Wenli, Wang Ying. Vegetation community of the wetland in Bayinbu Lake swan conservation of Xinjiang. *Ecological Science*, 2007, **26**(5): 443-446. [李文利, 王英. 巴音布鲁克天鹅湖保护区湿地植物群落研究. 生态科学, 2007, **26**(5): 443-446.]

[19] Gong Yanming, Hu Yukun, Adeli Maidi *et al*. Alpine grassland community characteristics at the different stages of degenerating succession in Bayanbulak. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(6): 149-152. [公延明, 胡玉昆, 阿德力·麦地等. 巴音布鲁克高寒草地退化演替阶段植物群落特性研究. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(6): 149-152.]

[20] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences ed. Soil physico-chemical analysis. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978: 1-593. [土壤理化分析. 中国科学院南京土壤研究所. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 1-593.]

[21] Braak CJF ter, Smilauer P. CANOCO reference manual and user's guide to CANOCO for windows: Software for canonical community ordination (version 4.5). New York: Microcomputer Power, Ithaca, 2002.

[22] Lososová Z, Chytrý M, Cimalová S *et al*. Weed vegetation of arable land in central Europe: Gradients of diversity and species composition. *Journal of Vegetation Science*, 2004, **15**(3): 415-422. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2004.tb02279.x.

[23] Li Enhua, Wang Xuelei, Cai Xiaobin *et al*. Features of aquatic vegetation and the influence factors in Erhai lakeshore wetland. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5): 738-746. DOI: 10.18307/2011.0511. [厉恩华, 王学雷, 蔡晓斌等. 洱海湖滨带植被特征及其影响因素分析. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 738-746.]

[24] Han Dayong, Yang Yongxing, Yang Yang. Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(7): 2236-2247. DOI: 10.5846/stxb201112312023. [韩大勇, 杨永兴, 杨杨. 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替. 生态学报, 2013, **33**(7): 2236-2247.]

[25] Wantzen KM, Rothhaupt KO, Mörtl M *et al*. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: An urgent issue. *Hydrobiologia*, 2008, **613**: 1-4. DOI: 10.1007/s10750-008-9466-1.

[26] Yang Tao, Gong Huili, Hu Jinming *et al*. Influences of long-term water stress on diversity characteristics of typical wetland

plant communities. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, **19**(6): 9-17. [杨涛, 宫辉力, 胡金明等. 长期水分胁迫对典型湿地植物群落多样性特征的影响. 草业学报, 2010, **19**(6): 9-17.]

[27] Chen Zhongli, Yuan Xingzhong, Liu Hong *et al*. Effects of water level fluctuation on plant communities in the littoral zone of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(6): 672-676. [陈忠礼, 袁兴中, 刘红等. 水位变动下三峡库区消落带植物群落特征. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(6): 672-676.]

[28] Wang Xiaorong, Chen Ruimei, Feng Xiaohui *et al*. Characteristics of soil seed banks in back water area of Three Gorges Reservoir water level fluctuating zone at initial stage of river flooding. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(12): 2891-2897. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2009.0435. [王晓荣, 程瑞梅, 封晓辉等. 三峡库区消落带回水区水淹初期土壤种子库特征. 应用生态学报, 2009, **20**(12): 2891-2897.]

[29] Mitsch WJ, Gosselink JG. Wetlands(4th Edition). New York: Wiley, 2007.

[30] Li Shusheng, An Yu, Wang Xuehong *et al*. Species composition and quantity characteristic of plant communities in Momoge wetlands under different water levels of surface water. *Wetland Science*, 2015, **13**(4): 466-470.[李树生, 安雨, 王雪宏等. 不同地表水水位下莫莫格湿地植物群落物种组成和数量特征. 湿地科学, 2015, **13**(4): 466-470.]

[31] Wang L, Song CC, Hu JM *et al*. Responses of regeneration diversity of the *Carex lasiocarpa* community to different water levels. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(1): 37-42. DOI: 10.1007/s11769-010-0037-9.

[32] Cui Lijuan, Ma Qiongfang, Hao Yunqing *et al*. Relationships between main plant communities and environment in Zoige marsh. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(11): 1749-1756. [崔丽娟, 马琼芳, 郝云庆等. 若尔盖高寒沼泽植物群落与环境因子的关系. 生态环境学报, 2013, **22**(11): 1749-1756.]

[33] Jensch D, Poschlod P. Germination ecology of two closely related taxa in the genus Oenanthe: Fine tuning for the habitat? *Aquatic Botany*, 2008, **89**: 345-351. DOI: 10.1016/j.aquabot.2008.03.013.

[34] Zhang Quanjun, Yu Xiubo, Qian Jianxin *et al*. Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(12): 3656-3669. DOI: 10.5846/stxb201111201768. [张全军, 于秀波, 钱建鑫等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征. 生态学报, 2012, **32**(12): 3656-3669.]

[35] Elser JJ, Bracken ESM, Cleland EE *et al*. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in fresh-water, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, **10**(12): 1135-1142. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x.

[36] Xiao Ye, Shang Lina, Huang Zhigang *et al*. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(8): 994-999. [肖烨, 尚丽娜, 黄志刚等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 地理科学, 2014, **34**(8): 994-999.]

[37] Qing Ye, Sun Feida, Li Yong *et al*. Analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus in degraded alpine wetland, Zoige, southwest China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(3): 38-46. DOI: 10.11686/cyxb20150304. [青烨, 孙飞达, 李勇等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关分析. 草业学报, 2015, **24**(3): 38-46.]

[38] Lü Yizhong, Li Baoguo eds. Soil Science. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 180-182. [吕贻忠, 李保国. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2013: 180-182.]

[39] Gao Guogang, Hu Yukun, Li Kaihui *et al*. Relationships between species diversity of plant communities and soil factors in alpine-cold grassland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **29**(3): 119-122. [高国刚, 胡玉昆, 李凯辉等. 高寒草地群落物种多样性与土壤环境因子的关系. 水土保持通报, 2009, **29**(3): 119-122.]

[40] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 1992, **73**(3): 1045-1055. DOI: 10.2307/1940179.

[41] FIink DF, Mitsch WJ. Hydrology and nutrient biogeochemistry in a created river diversion oxbow wetland. *Ecological Engineering*, 2007, **30**: 93-102. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.08.008.

[42] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 552-559. [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. 生态学报, 2004, **24**(3): 552-559.]

[43] Ren Xuemin, Yang Gaihe, Zhu Ya *et al*. Effect of environmental variables on species composition and richness of alpine vegetation in Taibai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(23): 6993-7003. DOI: 10.5846/stxb201303110392. [任学敏, 杨改河, 朱雅等. 环境因子对太白山高山植被物种组成和丰富度的影响. 生态学报, 2014, **34**(23): 6993-7003.]