

DOI: 10.5846/stxb201904070674

张晓雅, 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 邹建荣, 周远刚, 赵敏, 王园博. 不同生态保护地植物特征和土壤性质的对比研究——以黑河中游湿地为例. 生态学报, 2020, 40(9): 3027-3039.

Zhang X Y, Zhao R F, Zhang L H, Zhao H L, Zou J R, Zhou Y G, Zhao M, Wang Y B. Comparative study of plant characteristics and soil properties in different ecological protected areas: a case study of middle reaches of the Heihe River. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 3027-3039.

不同生态保护地植物特征和土壤性质的对比研究 ——以黑河中游湿地为例

张晓雅¹, 赵锐锋^{1,2,*}, 张丽华¹, 赵海莉¹, 邹建荣³, 周远刚¹, 赵敏¹, 王园博¹

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070

3 张掖国家湿地公园管委会, 张掖 734000

摘要: 选择黑河中游张掖国家湿地公园和张掖黑河湿地国家级自然保护区为研究对象, 对比分析了植物组成、物种多样性、植物生长状态、土壤养分、土壤理化性质及植物土壤间关系。结果显示: 湿地公园的植物高度和土壤养分含量(有机碳、全氮、速效氮、全磷、速效钾)显著高于自然保护区, 土壤理化性质含量(容重、pH)显著低于自然保护区, 表明湿地公园有利于植物生长发育、土壤养分固存、改善土壤质地; 自然保护区的植物科属种、多度、物种多样性(多样性指数、丰富度指数、均匀度指数)显著高于湿地公园, 表明自然保护区有利于维持植物多样性; 两种保护地中影响植物多样性的土壤因子不同, 湿地公园物种多样性与土壤全磷和速效磷显著正相关, 而自然保护区物种多样性与土壤盐分显著负相关。

关键词: 湿地; 生态保护地; 土壤; 植被; 黑河中游

Comparative study of plant characteristics and soil properties in different ecological protected areas: a case study of middle reaches of the Heihe River

ZHANG Xiaoya¹, ZHAO Ruifeng^{1,2,*}, ZHANG Lihua¹, ZHAO Haili¹, ZOU Jianrong³, ZHOU Yuangang¹, ZHAO Min¹, WANG Yuanbo¹

1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 GanSu Engineering Research Center of Land and Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China

3 Administration of Zhangye National Wetland Park, Zhangye 734000, China

Abstract: In this paper, the Zhangye National Wetland Park and the Zhangye Heihe Wetland National Nature Reserve in the middle reaches of the Heihe River were examined in order to compare plant composition, species diversity, plant growth status, soil nutrients, soil physical and chemical properties, and the relationship between vegetation characteristics and soil properties. The results showed that plant height and soil nutrient content (organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus, available potassium) in the Wetland Park were significantly higher than those in the Nature Reserve, and the soil physical and chemical properties (bulk density, pH) were significantly lower than those in the Nature Reserve, indicating that the Wetland Park is more conducive to plant growth and development, soil nutrient sequestration, and improved soil texture. The genus, abundance, and species diversity (diversity index, richness index, evenness index) of plants in the Nature Reserve are significantly higher than those in the Wetland Park, indicating that the Nature Reserve is more favorable to maintaining plant diversity. The plant species diversity index of the Wetland Park was significantly affected

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261047, 41761043); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划团队项目(NWNU-LKQN-17-7)

收稿日期: 2019-04-07; **网络出版日期:** 2020-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoruifeng@126.com

by soil total phosphorus and available phosphorus. The species diversity index of the Nature Reserve was significantly affected by soil salinity, indicating that the soil factors affecting plant diversity in different conservation areas were different.

Key Words: wetland; ecological protected areas; soil; vegetation; middle reaches of the Heihe River

湿地是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统,是生物多样性的摇篮以及人类赖以生存的环境之一^[1],其在蓄水、固碳和维持生物多样性等方面具有重要的生态服务价值^[2]。由于气候变暖和人类活动干扰,湿地正以惊人的速度退化,严重影响植物群落、土壤、水文乃至整个湿地生态系统的平衡,威胁区域生态安全及社会经济的可持续发展^[3-4]。为了缓解湿地退化带来的负面影响,世界各国积极采取各种保护措施,保护湿地的一种方法是将湿地周围的区域指定为受保护区域^[5]。

从国际保护区到地方重要性保护区,存在许多不同类型的保护地,如中国^[6]、意大利^[4]、埃塞俄比亚^[7]和美国^[8]分别成立湿地自然保护区、湿地公园、国家公园来保护土壤性质、淡水生态系统、大型无脊椎动物和鸟类、湿地植被等。在湿地生态保护中,植物特征与土壤性质之间的关系是一个关键问题^[6],因此了解特定生态系统中植物土壤间关系,对于类似区域的管理和开发中具有应用价值。此外对不同生态保护地之间的对比研究在生态学与管理学方面有重要意义,首先通过研究我们可以了解保护地对湿地生态环境的重要性并有效地进行湿地保护^[5];其次湿地保护管理者可以根据不同保护情况制定管理计划,提高湿地保护水平^[9]。但是关于保护地类型如何影响生物多样性、土壤性质及二者关系的信息较少^[5]。因此,学者对不同生态保护地之间的土壤性质、生物多样性及二者关系的差异研究相继展开。

国内外学者对湿地自然保护区和湿地公园的土壤养分、土壤理化性质、大型无脊椎动物和鸟类多样性、水体植物多样性和重金属含量进行对比研究,结果发现美国大沼泽地国家公园的土壤总磷含量较高,这与保护区和公园水文状况有关^[10];而加拿大艾伯塔省的土壤理化特征在两者间无显著差异^[11];埃塞俄比亚湿地自然保护区的大型无脊椎动物和鸟类多样性均较高,大型无脊椎动物多样性受人类干扰、水温、pH 的影响,鸟类多样性受植被覆盖、养分的影响^[7];鄱阳湖湿地国家级自然保护区植物多样性较丰富,湿地公园水体重金属含量高,这与人工采砂活动干扰、人工过多捕鱼有关^[12]。此外,研究发现植被土壤关系随保护地的不同而有差异。如研究人员在南欧意大利海岸自然保护区研究发现由于土壤盐度增加造成水生植物多样性的丧失^[4],而在中国辉河湿地国家级自然保护区的研究发现土壤全氮、全磷及含水量显著影响植物多样性^[13];段凯祥等^[14]在嘉峪关市草湖国家湿地公园发现土壤水分含量和植被盖度具有正相关性,而王继伟等^[15]在兰州秦王川国家湿地公园研究发现土壤盐分和植物盖度呈负相关。确定保护区类型对生物多样性、土壤性质及二者关系的影响对于理解生态系统过程具有重要意义。

中国政府为了保护湿地,基本形成了以湿地自然保护区为主体,湿地公园等相结合的湿地保护网络体系^[16]。由于干旱区湿地独特的地理位置和生态环境,使得干旱和半干旱地区的湿地被全球公认为需要优先保护^[17]。黑河中游湿地是典型的干旱内陆河流湿地,在黑河流域乃至河西走廊生态平衡中发挥着至关重要的生态作用,然而在过去的几十年里,受自然和人为作用的双重影响,湿地生态系统呈逐年退化和破碎化趋势^[18],已经引起了政府和学者的高度关注,实施了一系列湿地保护和恢复工程,并先后获批建设了张掖国家湿地公园和张掖黑河湿地国家级自然保护区^[19]。相应的科学研究也大量展开,目前对两种保护地的研究主要集中在动物多样性^[20]、土壤性质^[9,21-22]、植物群落特征及其与土壤因子的关系^[23-24]等方面,而没有涉及到二者的对比研究。为此,本文选择黑河中游张掖国家湿地公园和张掖黑河湿地国家级自然保护区为研究对象,通过野外调查和采样来明确两种生态保护地的植物特征、土壤性质及植物土壤关系的差异。我们假设:(1)自然保护区有利于维护植物物种多样性;(2)湿地公园有利于改善植物生长状态和土壤性质;(3)两种生态保护地中影响植物特征的土壤因子是不同的。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑河中游地区($98^{\circ}57'—100^{\circ}52' E, 38^{\circ}39'—39^{\circ}59' N$), 该区属于典型的温带大陆性气候, 干旱少雨且蒸发强烈, 日照充足。土壤类型以灰棕漠土和灰漠土为主, 主要植物有芦苇(*Phragmites australis*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。其中张掖黑河湿地国家级自然保护区(简称自然保护区, Nature Reserve, NR)是在 2011 年 4 月由国务院批准建立的, 位于莺落峡和正义峡之间, 总面积约为 41164.56 hm^2 , 主要保护对象为我国西北典型内陆河流湿地、水域生态系统、生物多样性、西北荒漠区的绿洲植被^[19,25]。张掖国家湿地公园(简称湿地公园, Wetland Park, WP)自 2009 年 12 月被国家林业局批复为国家湿地公园, 位于张掖市甘州区城郊北部、黑河东侧, 与市区紧密相连, 总面积约为 4133.3 hm^2 , 主要保护对象为湿地水量、水禽栖息地、湿地生物多样性、湿地植被, 并且坚持以生态保护为主, 合理适度开发旅游项目, 发展生态体验、科普教育、休闲健身等旅游项目^[19]。自然保护区以保护自然资源为主, 而湿地公园不仅是为了保护自然资源, 还为了保护给人类以可以直接利用的景观、休闲、旅游、教育空间。自然保护区主要依靠自然过程恢复, 较少人为参与管理, 湿地公园有人为引水灌溉、施肥、栽种植物如芦苇、并伴有刈割等管理行为, 有移除表层土壤, 建造护堤、改造土层结构的的活动, 从干扰强度来看, 湿地公园大于湿地自然保护区(图 1)。

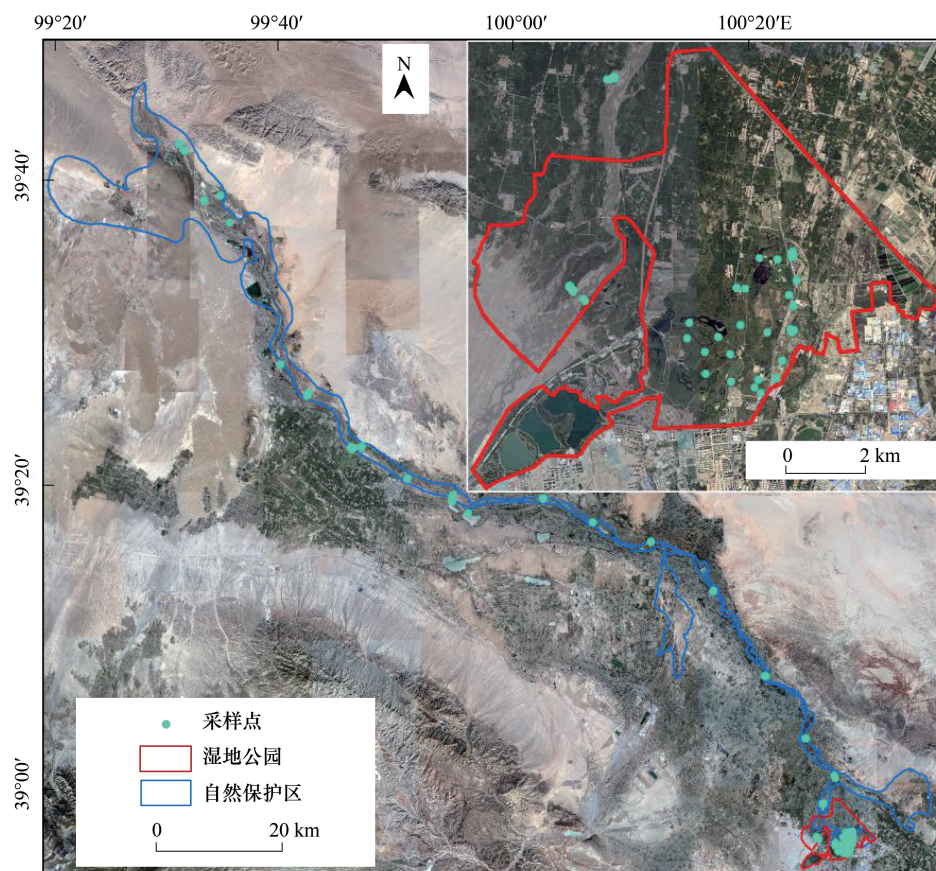


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch map of the location of the study area

WP: 湿地公园 Wetland park; NR: 自然保护区 Nature reserve

1.2 采样和分析方法

2017 年 7—8 月对黑河中游湿地植被和土壤进行全面综合考查, 由于自然保护区和湿地公园面积差异较

大,为了尽量保证样方均匀分布于自然保护区和湿地公园的典型生境,进而全面客观的反映自然保护区和湿地公园的植物和土壤特征,在自然保护区内沿河流大致以 5 km 为间距设置样地,使得样地尽可能均匀分布,最终设置调查样地 19 个,在湿地公园典型生境按照道路分布情况设置调查样地 4 个。根据群落特征在各个样地内设置 1 m×1 m 草本样方或 30 m×30 m 乔灌木样方,最终在自然保护区和湿地公园分别设置样方 73 个和 25 个。同步进行植物与土壤采样,记录样方的基本状况如经纬度、海拔等,以及群落学特征如物种种类、数量、株高、冠幅等。沿样方对角线用环刀法均匀按 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 进行分层采样各取 3 份装入铝盒并称鲜重,另取一份均匀混合好的土样装袋并标号,带回室内测定土壤物理化学性质。

在实验室中,土壤样品在常温下风干、碾碎,依次通过 1、0.250 mm 和 0.149 mm 的筛子去除动、植物残体和砾石等物质。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定;总氮采用凯氏定氮法测定;总磷采用硫酸-高氯酸消煮法测定;速效氮采用流动分析仪(SKALAR 8505)测定;速效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定^[21];速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法测定;容重和土壤含水量采用烘干法测定,在 105℃ 烘箱中烘 48h;pH 值采用 PHS-3C 酸度计(土水比 1:5)测定;土壤盐分采用重量法测定。

1.3 数据分析

采用总盖度、总多度和平均高度来表征植物生长状态。总盖度指样方内各物种盖度之和,总多度指样方内各物种数量之和,平均高度是样方内所有物种高度的平均值。常见物种是指在样地内 40% 或者以上的样方中出现的物种。优势物种是指在样地内覆盖率达 20% 或以上的物种^[26]。植物群落的 Patrick 丰富度指数(R),Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(E)均可用来表征物种多样性特征,其中 R 代表一个群落或生境中物种数目的多寡; H 代表群落物种个体出现的不稳定性,包括种类的数目和种类中个体分配均匀性两个因素; E 代表群落中全部物种个体数的分布状况,计算公式如下^[27]:

$$\text{Patrick 丰富度指数}(R): R = S$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}(H): H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(E): E = H / \ln S$$

式中, P_i 为物种 i 的重要值(相对高度+相对多度+相对盖度)/3, S 为物种 i 所在样方的物种总数。

在进行统计分析之前转换所有数据以满足正态性标准和方差同质性检验。使用 Duncan 多重比较的单因素方差分析评估土壤性质和植物多样性的差异性。使用 Pearson 相关分析来比较不同生态保护地下土壤性质和植物多样性之间的关系。显著差异均在 0.05 水平上评估。所有数据的统计分析均使用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行,采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果

2.1 不同生态保护地的植物特征

2.1.1 不同生态保护地的植物组成

调查结果显示,在湿地公园和自然保护区中共出现了植物 30 科 70 属 99 种,包括 4 种乔木,5 种灌木,4 种半灌木,86 种草本植物,禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)和藜科(Chenopodiaceae)的物种较多,分别占物种总数的 16.16%、13.13% 和 12.12%。其中湿地公园出现物种 46 种,隶属于 18 科 41 属,占物种总数的 46.46%,自然保护区出现物种 80 种,隶属于 24 科 55 属,占物种总数的 80.81%,两种保护地中的共有种有 27 种。可以看出自然保护区中的植物科属种均高于湿地公园(图 2)。

由表 1 可知,自然保护区的优势物种主要以多年生草本、灌木或小乔木为主,既有鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、水葱(*Scirpus validus*)、中间型荸荠(*Heleocharis intersita*)等对水分需求相对高的多年生草本植物,也有赖草等中旱生多年生草本,还有密花怪柳(*Tamarix arceuthoides*)、多花怪柳(*Tamarix ramosissima*)、线叶柳

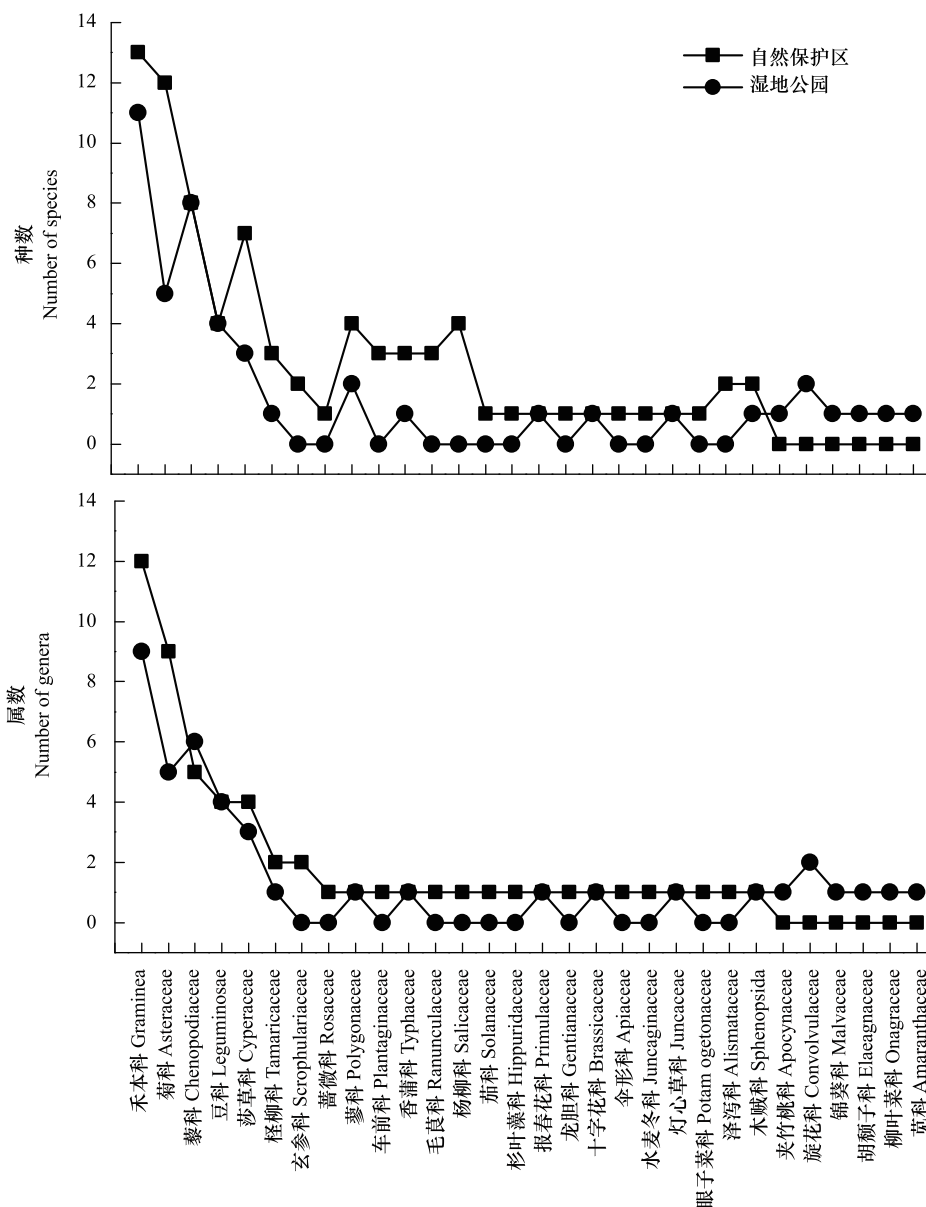


图2 不同生态保护地的植物科属组成

Fig.2 Composition of plant species in different ecological protection areas

(*Salix wilhelmsiana*) 等对环境适应性较强的灌木或小乔木;湿地公园的优势物种主要以需水性一年生和多年生草本为主。自然保护区的常见物种以多年生草本为主,既有蓼子朴 (*Inulasalsoloides*)、小蓟 (*Cirsium setosum*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*) 等中旱生植物,又有小香蒲 (*Typha minima*)、长苞香蒲 (*Typha angustata*)、泽泻 (*Alisma gramineum*) 等沼生或水生草本;湿地公园的常见物种主要为芦苇、灰绿藜 (*Malva verticillata*)、扁秆蔗草 (*Scirpus planiculmis*)、沼生柳叶菜 (*Epilobium palustre*) 等需水性较强的多年生草本。

2.1.2 不同生态保护地的植物生长状态

由图3可知,湿地公园和自然保护区的植物高度和多度存在显著差异 ($P < 0.05$),湿地公园中的植物高度 (89.46 ± 10.05) cm 显著高于自然保护区 (33.61 ± 3.30) cm,而自然保护区的单位面积植被多度 (440.41 ± 63.03) 显著高于湿地公园 (122.72 ± 14.82)。植物盖度在两种保护地下无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 1 不同生态保护地的植物优势物种和常见物种

Table 1 Common and dominant species in different ecological protection areas

保护地 Protection areas	优势物种 Dominant species	常见物种 Common species
自然保护区 NR Nature reserve	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	芦苇 <i>Phragmites australis</i>
	旋覆花 <i>Inula japonica</i> Thunb	拂子茅 <i>Calamagrostis epigeios</i>
	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	扁秆蔗草 <i>Scirpus planiculmis</i>
	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	小蓟 <i>Cirsium setosum</i>
	水葱 <i>Scirpus validus</i>	三裂碱毛茛 <i>Halerpestes tricuspis</i>
	无芒稗 <i>Echinochloa crusgali</i>	长苞香蒲 <i>Typha angustata</i>
	酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	假苇拂子茅 <i>Calamagrostis pseudophragmites</i>
	中间型荸荠 <i>Heleocharis intersita</i>	碱蓬 <i>Leymus secalinus</i>
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	草泽泻 <i>Alisma gramineum</i>
	密花怪柳 <i>Tamarix arceuthoides</i>	蒙山莴苣 <i>Lactuca tatarica</i>
	多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	蔗草 <i>Scirpus triqueter</i>
	多花怪柳 <i>Tamarix hohenackeri</i>	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>
	线叶柳 <i>Salix wilhelmsiana</i>	披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>
	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	小香蒲 <i>Typha minima</i>
	白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carr 等	蓼子朴 <i>Inulasololoides</i>
		斜茎黄芪 <i>Astragalus adsurgens</i> Pall 等
湿地公园 WP Wetland park	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	芦苇 <i>Phragmites australis</i>
	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	扁秆蔗草 <i>Scirpus planiculmis</i>
	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>
	碱蓬 <i>Leymus secalinus</i>	灰绿藜 <i>Malva verticillata</i>
	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	沼生柳叶菜 <i>Epilobium palustre</i> 等
	白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carr 等	

2.1.3 不同生态保护地的物种多样性

由图 4 可知,湿地公园和自然保护区中的物种多样性指数变化趋势一致,两种保护地下的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均存在显著差异 ($P<0.05$),且自然保护区中的值较高。自然保护区中的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数分别为 6.74 ± 0.41 、 1.31 ± 0.05 和 0.76 ± 0.02 ,湿地公园中的分别为 4.24 ± 0.33 、 0.88 ± 0.09 和 0.61 ± 0.05 。

2.2 不同生态保护地的土壤性质

2.2.1 不同生态保护地的土壤水分、盐分、容重和 pH 值

由图 5 可知,在 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 土层,土壤水分含量和盐分含量在两种保护地之间没有显著差异 ($P>0.05$),土壤容重和 pH 值在自然保护区中显著高于湿地公园 ($P<0.05$)。自然保护区土壤盐分在不同土层有显著差异,两种保护地土壤容重均在不同土层有显著差异 ($P<0.05$),而两种保护地土壤水分含量和 pH 值在不同土层均没有统计学差异 ($P>0.05$)。两种保护地土壤盐分含量随土层深度增加而降低,土壤容重和 pH 值随土层深度增加而增加。

2.2.2 不同生态保护地的土壤碳、氮、磷和钾

由图 6 可知,在 0—10、10—20 cm 和 20—40 cm 土层,土壤有机碳、全氮、速效氮、全磷和速效钾含量在湿地公园显著高于自然保护区 ($P<0.05$),而速效磷含量在两种保护地之间没有显著差异 ($P>0.05$)。两种保护地下的土壤有机碳在不同土层均有显著差异,自然保护区土壤的全氮、速效氮、全磷和速效钾含量在不同土层有显著差异 ($P<0.05$),而两种保护地土壤的速效磷含量在不同土层均没有统计学差异 ($P>0.05$)。两种保护地下的土壤养分都随深度增加而降低。

2.3 不同生态保护地植物特征与土壤性质的关系

由表 2 可知,在湿地公园中,植物盖度与土壤盐分、速效氮和速效钾呈极显著负相关 ($P<0.01$)。植物高度与土壤 pH 值和速效磷呈显著负相关,与含水量呈显著正相关 ($P<0.05$)。植物多度与土壤速效磷呈显著负

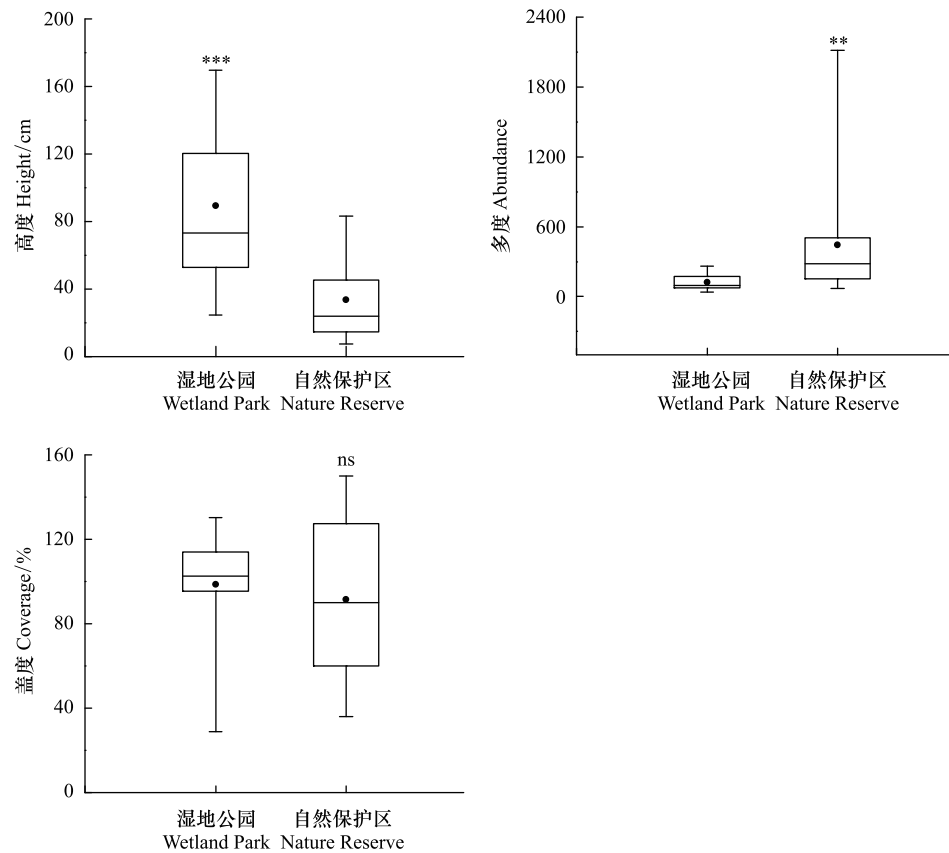


图3 不同生态保护地的植被生长状态

Fig.3 The state of vegetation growth in different ecological protection areas

方框图;第5、25、75和95百分位数绘制为带有误差线的垂直方框,黑点表示平均值,实线表示中位数;不同保护地之间的显著差异用符号表示如下:*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$; ns(无显著差异)

表2 不同生态保护地的植物特征和土壤性质的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficient of plant characteristics and soil properties in different ecological protection area

	水分 WC	容重 BD	盐分 SA	pH	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	速效磷 AP	速效氮 AN	速效钾 AK
湿地公园 WP										
盖度 Coverage	0.352	-0.271	-0.705 ***	-0.329	0.331	0.140	-0.093	-0.098	-0.539 ***	-0.527 ***
高度 Height	0.403 *	-0.241	-0.263	-0.465 *	0.247	0.213	-0.338	-0.435 *	-0.151	-0.261
多度 Abundance	0.225	-0.097	0.199	0.066	0.019	-0.104	-0.369	-0.424 *	0.114	0.193
丰富度指数 Richness index	-0.125	0.127	-0.364	0.232	-0.104	-0.163	0.191	0.349	-0.460 *	-0.167
多样性指数 Diversity index	-0.315	0.287	-0.093	0.335	-0.271	-0.264	0.390 *	0.496 ***	-0.235	-0.003
均匀度指数 Evenness index	-0.383 *	0.299	0.356	0.314	-0.373	-0.289	0.397 *	0.435 *	0.193	0.334
自然保护区 NR										
盖度 Coverage	0.383 ***	-0.278 *	0.203	-0.316 ***	0.347 ***	0.368 ***	0.126	0.131	0.230	0.218
高度 Height	0.505 ***	-0.523 ***	-0.032	-0.494 ***	0.498 ***	0.508 ***	-0.063	-0.051	0.285 *	-0.109
多度 Abundance	0.199	-0.175	-0.037	-0.200	0.137	0.154	-0.118	-0.073	0.059	0.081
丰富度指数 Richness index	0.149	-0.039	-0.354 ***	0.014	0.034	0.035	-0.189	-0.186	-0.103	-0.277 *
多样性指数 Diversity index	0.168	-0.058	-0.295 *	-0.047	0.071	0.081	-0.181	-0.118	-0.026	-0.218
均匀度指数 Evenness index	0.108	-0.051	-0.084	-0.127	0.081	0.101	-0.041	0.061	0.096	-0.014

* 表示 0.05 水平上的显著性, ** 表示 0.01 水平上的显著性;土壤因子:WC:土壤水分含量 Water content;BD:容重 Bulk density;SA:盐分 Salinity;pH:酸碱度;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;AP:速效磷 Available phosphorus;AN:速效氮 Available nitrogen;AK:速效钾 Available potassium

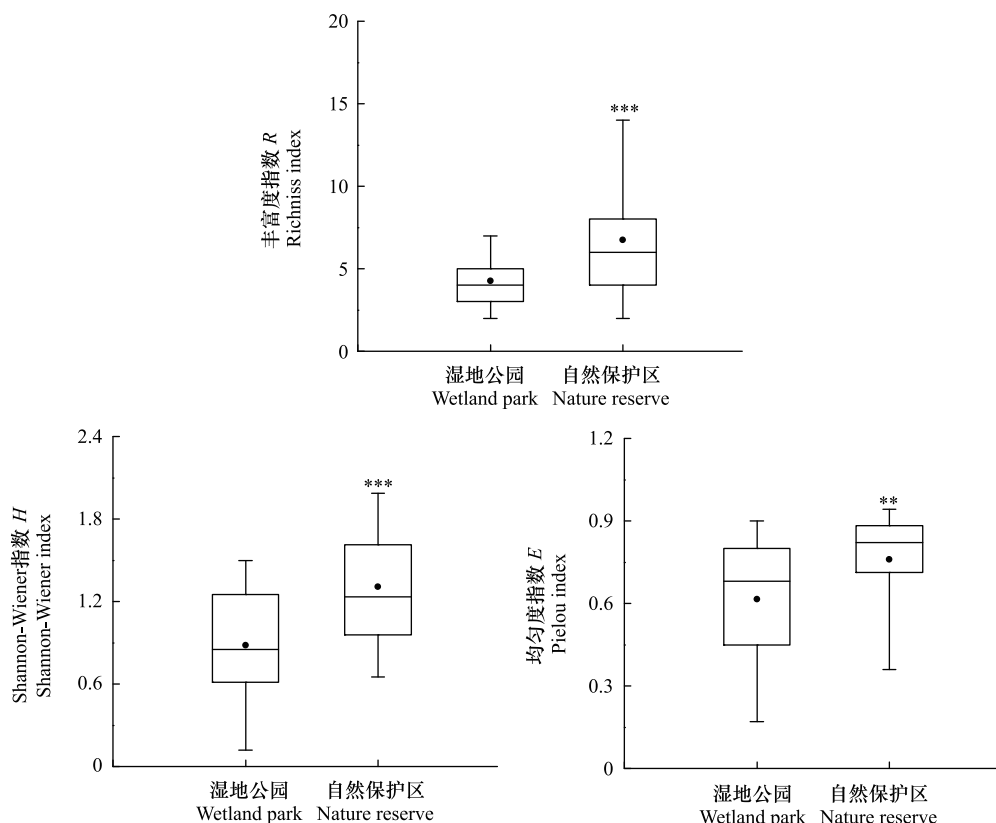


图4 不同生态保护地的物种多样性

Fig.4 The state of vegetation growth in different ecological protection areas

方框图;第5、25、75和95百分位数绘制为带有误差线的垂直方框,黑点表示平均值,实线表示中位数;不同保护地之间的显著差异用符号表示如下:*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$; ns(无显著差异)

相关。丰富度指数与速效氮呈显著负相关。多样性指数和均匀度指数受全磷和速效磷的影响显著。在自然保护区中,植物盖度和高度与土壤水分、有机碳和全氮呈极显著正相关,与土壤容重和 pH 值呈极显著负相关。多样性指数和丰富度指数与盐分呈显著负相关(表2)。

3 讨论

3.1 不同生态保护地植物多样性的变化

湿地保护与恢复可以为湿地物种创造可持续生长的条件^[28]。本文研究结果表明,自然保护区的植物多度和物种多样性显著高于湿地公园。这与多数学者研究结果一致,较少人为参与有利于维护物种多样性和群落结构^[29],人为干扰较强会降低物种多样性^[30]。湿地公园给人类提供科普教育、观光游憩、生态体验等服务功能,较强的人为干扰能对湿地公园产生明显影响,使植被多度和物种多样性发生不同程度的变化^[31],例如游客的反复践踏可造成地上植物的部分损坏或死亡,进而使湿地公园植物的多度衰减^[32];人为活动增加了植物物种之间的竞争力,最终使具有较强适应能力的物种得以生存,导致物种多样性减少^[33]。自然保护区原则上只有实验区能选择性的开展参观旅游等不破坏自然环境的活动,其核心区和缓冲区禁止人为活动,这就使得接近自然的栖息地得以保护,从而物种多样性得到保护^[34]。湿地公园通过移除土壤表层,用来建造护堤形成洼地,使土壤种子库中存活的种子被大量移走^[26],降低了种子库在物种多样性方面的潜力。湿地公园有人为大量种植芦苇,使植被种类趋于简单。此外,湿地公园土壤养分含量较高,随着土壤肥力的增加,富有竞争力的物种如芦苇等在环境中占优势,群落中的优势种在养分等资源竞争上胜过别的植物,使其获得的生存

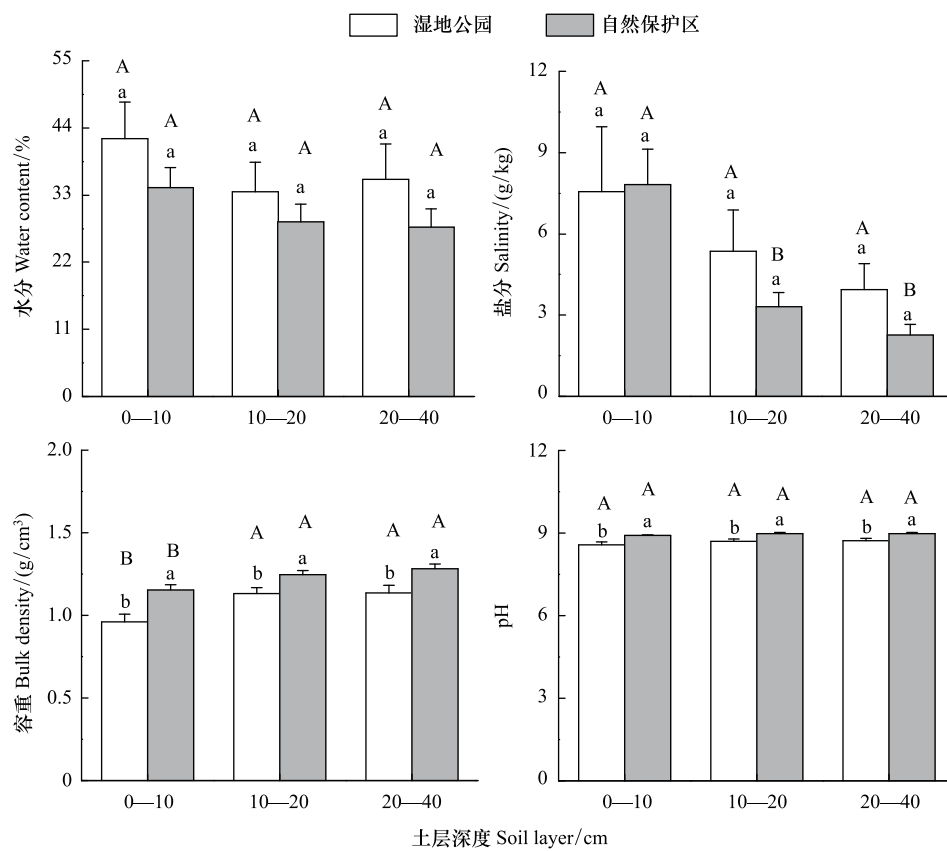


图5 不同生态保护地下的土壤含水量、盐分、容重、pH 值

Fig.5 Soil moisture, salinity, bulk density and pH value under different ecological protection ares

误差线为标准误差;小写字母表示同一土层不同保护地之间的显著差异,大写字母表示同一保护地不同土层之间的显著差异($P < 0.05$)

空间和养分较少,从而导致植物多样性较低^[35]。因此,物种多样性的差异可能是受旅游干扰、移除土壤表层和养分含量的影响所致。

本文研究结果显示,湿地公园的植物高度显著高于自然保护区,表明湿地公园对物种的生长发育有一定促进作用。虽然湿地公园有定期施肥,但研究表明植物多样性与土壤有机质积累和养分浓度等指标之间没有关系,施肥并不会显著地改变物种多样性^[30],施肥、充足的养分却可以有效促进植物的生长繁殖,适当的人工管理可以促进植物生长发育^[9],保证湿地景观。其次,湿地公园有人工移植芦苇,芦苇在水分条件充足时极易形成较高且连片的芦苇群落,而自然保护区植被大部分是低矮的草本植物,这使得公园植物高度较高。另外,本研究中土壤 pH 呈碱性且自然保护区中的值高于湿地公园,土壤 pH 值高时不利于植物生长发育^[22,36]。因此,植物高度的差异是受施肥、植物移植和土壤 pH 等的影响所致。

3.2 不同生态保护地土壤性质的变化

3.2.1 不同生态保护地土壤容重、水分、盐分和 pH 的变化

土壤容重是衡量土壤物理性质和孔隙度的重要指标,影响着土壤的透水性^[37]。本文研究结果表明,湿地公园的土壤容重显著低于自然保护区。湿地公园所在区域进行建设前为退耕地,土壤容重差异受湿地保护前土地利用方式的影响,耕作、播种农业实践对土壤扰动大,导致土质疏松,土壤孔隙度增加,土壤容重降低,另外施用有机肥使土壤中有机质含量增加,有利于大团聚体的形成,增加土壤孔隙度,从而降低土壤容重^[38]。湿地公园中有人为浇灌,有研究发现土壤容重与土壤水分负相关^[39],这可能是造成土壤容重差异的另一个原因。湿地水文条件在湿地生态系统的结构和功能中有着关键作用。本文研究结果表明,土壤水分含量和盐分含量在两种保护地之间没有显著差异,这与 Roy 等^[11]的研究结果相似。

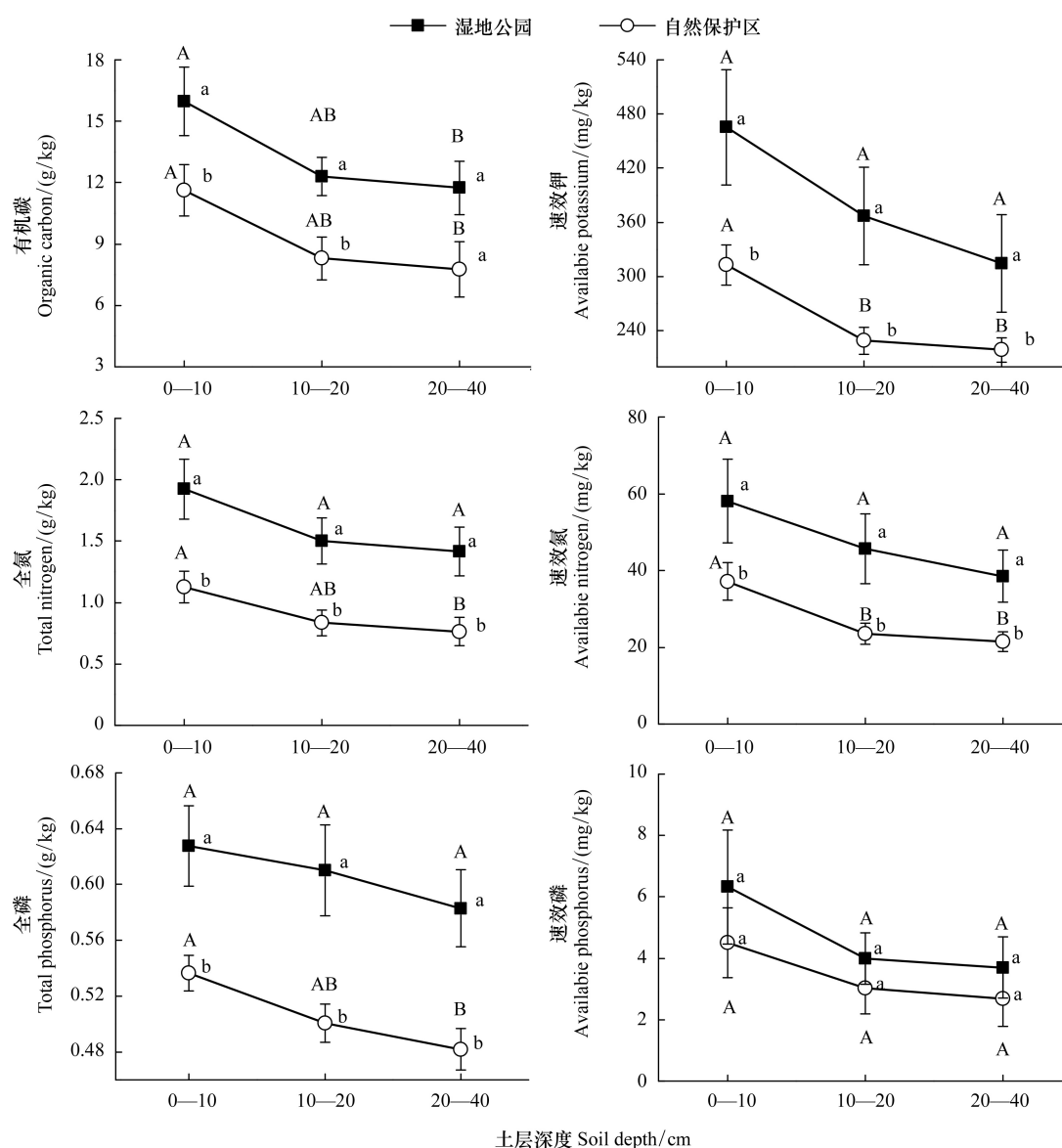


图6 不同生态保护地的土壤碳、钾、氮、磷

Fig.6 Soil carbon, potassium, nitrogen and phosphorus in different ecological protection areas

误差线为标准误差;小写字母表示同一土层不同保护地之间的显著差异,大写字母表示同一保护地不同土层之间的显著差异 ($P < 0.05$)

土壤酸碱度是土壤重要的化学性质之一,与植物生长和土壤肥力紧密相关^[36]。本文研究结果表明,pH值呈碱性且湿地公园显著低于自然保护区。湿地公园有旅游干扰如游客践踏和乱扔垃圾等行为,而局部微环境和外来物质的变化会引起土壤酸碱度的改变,这在一定程度上降低了土壤pH值^[40]。湿地公园常伴有人工灌溉,区域内有流水可见,当碱性土壤长期处于渍水环境时,土壤pH值会降低^[41]。湿地公园有机碳含量较高,土壤有机碳含量增加会影响土壤中的阳离子,从而降低土壤pH值^[42]。此外,本研究中的湿地公园位于自然保护区上游,越往下游土壤盐分含量越高,而自然状态下盐碱土的碱度随着盐分积累而增加,所以自然保护区pH值较高。因此,土壤pH值的差异是受旅游干扰、人为浇灌、地理位置和有机碳含量等的影响所致。

3.2.2 不同生态保护地土壤有机碳、氮和磷的变化

湿地土壤有机碳和氮含量是衡量湿地土壤质量的良好指标^[43]。本文研究结果显示,湿地公园的土壤有机碳、全氮和速效氮含量显著高于自然保护区。有研究发现类似结果,人为参与有助于土壤有机碳和氮的积

累^[44]。湿地公园恢复前为耕地,有人为施肥残留及定期喷药等管理措施导致湿地公园的土壤有机碳、总氮和速效氮高于自然保护区^[45]。湿地公园有人为种植芦苇,有学者在研究湿地不同植物的土壤氮含量时发现,与芦苇相对应的土壤氮含量最高^[46]。湿地公园在植物生长状况方面显著好于自然保护区,恢复湿地土壤氮素增减受植物生长情况影响^[47]。因此土壤有机碳和氮含量的差异是受湿地保护前土地利用方式、人为施肥、植物生长状况等的影响所致。

湿地土壤磷含量变化显著影响着湿地生态系统的生产力^[48]。研究结果显示,湿地公园的土壤全磷含量显著高于自然保护区,这与 Cohen 等^[10]、Barrico 等^[34]的研究结果相同。湿地公园大量的除草、喷药等管理措施,极易导致残余化学物质流入水体造成污染,干扰强烈的区域水体具有较高的总氮和总磷含量^[49],植物在生长过程中吸收水分导致植物具有较高的氮磷含量,而土壤中的磷主要来自植物残体的输入和成土母岩的风化作用^[46],这导致湿地公园土壤磷含量较高。湿地公园土壤碳氮含量高于自然保护区,湿地土壤有机碳、氮和磷相互之间有着密切的联系,通常当土壤有机碳含量高时,土壤氮磷含量也较高^[37]。湿地公园有可能部分受以前耕地施肥残留及人类废弃物的影响出现富营养化现象使土壤磷含量较高。此外,本研究中湿地公园的优势物种为芦苇,芦苇的土壤磷含量高于其他湿地植物^[46]。因此,湿地土壤碳氮磷之间的联系、耕地施肥残留等是导致湿地公园和自然保护区土壤磷含量差异的因素。

3.3 不同生态保护地土壤性质与植物多样性的关系

湿地物种多样性与土壤性质之间的关系在湿地生态系统的特征和稳定性中起着重要作用^[35]。本文研究结果表明,影响湿地公园和自然保护区物种多样性的土壤因子不同。湿地公园中多样性指数主要受全磷和速效磷的影响显著,自然保护区中多样性指数主要受盐分的影响,这与多数学者的研究结果一致^[13]。湿地公园中植物多度与土壤速效磷呈显著相关,自然保护区中植物多度与土壤因子无显著相关性,这可能是由于湿地公园有施肥影响所致。

公园和保护区的植被特征与土壤性质之间关系的不同可能是由于土壤性质具有空间变异性^[6]。人为活动会改变植物和土壤性质,因此人为干扰的差异也是影响湿地物种多样性与土壤性质之间关系不一致的原因^[13]。土壤养分影响植物生长,土壤养分的差异会导致其与植物特征的关系不同^[35]。也有学者认为物种多样性是地理环境、土壤环境和干扰强度等因素共同作用的结果^[50]。

3.4 对湿地保护和管理的启示

湿地公园和自然保护区的植物特征和土壤性质差异明显,这是因为不同生态保护地的管理方式以及干扰强度不一致。从保护湿地景观角度看,湿地公园有利于植物生长发育^[10,34],良好的植物生长状态又有利于吸引更多游客观赏,从而提高湿地公园的收入。自然保护区的植物生长状态较差,且保护区选择性的开展参观旅游活动,这对保护区带来的收益较少。从维护物种多样性角度看,自然保护区较少人为参与有利于维护物种多样性,从而更好的维护植物群落结构^[29,32]。湿地公园由于人工传统管理实践和游客活动等干扰,使物种多样性较低,植物群落结构较单一,导致群落受外界影响大、自我调节能力弱、稳定性差,不利于植物群落结构的维护^[9]。从土壤养分固存和土壤质地改善角度看,湿地公园有利于保护土壤性质,自然保护区在土壤固碳、固氮等方面的成效不佳,这可能与湿地公园保护前土地利用方式、喷药、湿地土层结构改造等有关。综上所述,湿地公园的植物生长状态和湿地景观较好,有利于土壤养分固存和土壤质地的改善,并且满足公众需要和社会经济发展的需要,在管理保护过程中需要人工干预,不断的进行引水浇灌、栽种植等管理行为,需要投入大量人力物力。自然保护区有利于维护物种多样性和植物群落结构,在保护过程中不需要使用大量的人力进行管理,投入较低。因此,湿地公园和自然保护区对于旱区湿地保护和可持续发展都很重要。

4 结论

黑河中游湿地不同生态保护地的土壤性质和植被特征及其关系差异明显。湿地公园的植物高度和土壤有机碳、全氮、速效氮、全磷、速效钾含量显著高于自然保护区,土壤容重、pH 显著低于自然保护区,表明湿地

公园有利于植物生长发育、土壤养分固存、改善土壤质地;自然保护区的植物科属种、多度、多样性指数、丰富度指数、均匀度指数显著高于湿地公园,表明自然保护区有利于维持植物多样性;影响两种保护地下植物多样性的土壤因子不同,公园物种多样性指数受土壤全磷和速效磷的影响显著,自然保护区物种多样性指数受土壤盐分的影响显著。两种保护地对黑河中游湿地的保护具有重要作用。

参考文献 (References):

- [1] Laurance S G W, Baider C, Florens F B V, Ramrekha S, Sevathian J C, Hammond D S. Drivers of wetland disturbance and biodiversity impacts on a tropical oceanic island. *Biological Conservation*, 2012, 149(1): 136-142.
- [2] Inglett P W, Inglett K S. Biogeochemical changes during early development of restored calcareous wetland soils. *Geoderma*, 2013, 192: 132-141.
- [3] Bai J H, Cui B S, Cao H C, Li A N, Zhang B Y. Wetland degradation and ecological restoration. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 523632.
- [4] Gerdol R, Brancaloni L, Lastrucci L, Nobili G, Pellizzari M, Ravaglioli M, Viciani D. Wetland plant diversity in a coastal nature reserve in Italy: relationships with salinization and eutrophication and implications for nature conservation. *Estuaries and Coasts*, 2018, 41(7): 2079-2091.
- [5] Furlonge T, Dyer F, Davis J. The influence of differing protected area status and environmental factors on the macroinvertebrate fauna of temperate austral wetlands. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 4: 277-290.
- [6] Liu S L, Hou X Y, Yang M, Cheng F Y, Coxix A, Wu X, Zhang Y Q. Factors driving the relationships between vegetation and soil properties in the Yellow River Delta, China. *CATENA*, 2018, 165: 279-285.
- [7] Chawaka S N, Boets P, Goethals P L M, Mereta S T. Does the protection status of wetlands safeguard diversity of macroinvertebrates and birds in southwestern Ethiopia? *Biological Conservation*, 2018, 226: 63-71.
- [8] Pitt A L, Hawley H J, Baldwin R F, Baldwin E D, Brown B L. Small parks as local social-ecological systems contributing to conservation of small isolated and ephemeral wetlands. *Natural Areas Journal*, 2018, 38(4): 237-249.
- [9] 周远刚, 赵锐锋, 赵海莉, 张丽华, 赵敏, 邹建荣. 黑河中游湿地不同恢复方式对土壤和植被的影响——以张掖国家湿地公园为例. *生态学报*, 2019, 39(9): 3333-3343.
- [10] Cohen M J, Lamsal S, Osborne T Z, Bonzongo J C J, Newman S, Reddy K R. Soil total mercury concentrations across the greater everglades. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 675-685.
- [11] Roy M C, Azaria E T, Locky D, Gibson J J. Plant functional traits as indicator of the ecological condition of wetlands in the Grassland and Parkland of Alberta, Canada. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 483-491.
- [12] 简敏菲, 李玲玉, 余厚平, 熊建秋, 余冠军. 鄱阳湖湿地水体与底泥重金属污染及其对沉水植物群落的影响. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 96-105.
- [13] 罗琰, 苏德荣, 吕世海, 布和, 贺晶, 谢晶杰. 辉河湿地河岸带植物物种多样性与土壤因子的关系. *湿地科学*, 2016, 14(3): 396-402.
- [14] 段凯祥, 张松林, 赵成章, 彭鑫波, 隗伟超, 杨鹏, 杨晔, 姜右锦, 骆艳. 嘉峪关草湖湿地土壤水分含量与植被盖度的空间格局. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 726-734.
- [15] 王继伟, 赵成章, 赵连春, 王小鹏, 李群. 内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(13): 4843-4851.
- [16] 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 宫鹏. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. *科学通报*, 2012, 57(1): 1-24.
- [17] Minckley T A, Turner D S, Weinstein S R. The relevance of wetland conservation in arid regions: a re-examination of vanishing communities in the American Southwest. *Journal of Arid Environments*, 2013, 88: 213-221.
- [18] Zhao R F, Xie Z L, Zhang L H, Zhu W, Li J, Liang D. Assessment of wetland fragmentation in the middle reaches of the Heihe River by the type change tracker model. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 177-188.
- [19] 付宗斌, 韩涛, 梁光明, 王钰婷. 甘肃黑河中游湿地保护利用现状及对策初探. *湿地科学与管理*, 2016, 12(3): 40-42.
- [20] 张晶, 赵成章, 任悦, 李雪萍, 雷蕾. 张掖国家湿地公园优势鸟类种群生态位研究. *生态学报*, 2018, 38(6): 2213-2220.
- [21] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 姜朋辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *地理科学*, 2013, 33(3): 363-370.
- [22] 白娜, 王立, 孔东升. 黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究. *草业学报*, 2017, 26(5): 15-28.
- [23] 杨宋琪, 陈天仁, 克选, 罗光宏. 张掖国家湿地公园浮游植物群落结构特征. *生物学杂志*, 2017, 34(6): 51-55, 100-100.
- [24] Ding J Y, Zhao W W, Fu B J, Wang S, Fan H. Variability of *Tamarix* spp. characteristics in riparian plant communities are affected by soil properties and accessibility of anthropogenic disturbance in the lower reaches of Heihe River, China. *Forest Ecology and Management*, 2018, 410: 174-186.
- [25] 孔东升, 张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. *生态学报*, 2015, 35(4): 972-983.

- [26] Yepsen M, Baldwin A H, Whigham D F, McFarland E, LaForgia, Lang M. Agricultural wetland restorations on the USA Atlantic Coastal Plain achieve diverse native wetland plant communities but differ from natural wetlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 11-20.
- [27] Zhang Y R, Wang R Q, Kaplan D, Liu J. Which components of plant diversity are most correlated with ecosystem properties? A case study in a restored wetland in northern China. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 228-236.
- [28] Weyembergh G, Godefroid S, Koedam N. Restoration of a small-scale forest wetland in a Belgian nature reserve: a discussion of factors determining wetland vegetation establishment. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 2010, 14(4): 381-394.
- [29] Kołos A, Banaszuk P. Mowing as a tool for wet meadows restoration: effect of long-term management on species richness and composition of sedge-dominated wetland. *Ecological Engineering*, 2013, 55: 23-28.
- [30] Petersen J E, Brandt E C, Grossman J J, Allen G A, Benzing D H. A controlled experiment to assess relationships between plant diversity, ecosystem function and planting treatment over a nine year period in constructed freshwater wetlands. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 531-541.
- [31] 张敏, 潘艳霞, 杨洪晓. 山东半岛潮上带沙草地的物种多度格局及其对人为干扰的响应. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 542-550.
- [32] Gibbes C, Southworth J, Keys E. Wetland conservation: change and fragmentation in Trinidad's protected areas. *Geoforum*, 2009, 40(1): 91-104.
- [33] Mace G M, Norris K, Fitter A. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 27(1): 19-26.
- [34] Barrico L, Castro H, Coutinho A P, Gonçalves M T, Freitas H, Castro P. Plant and microbial biodiversity in urban forests and public gardens: insights for cities' sustainable development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 19-27.
- [35] 段后浪, 赵安, 姚忠. 恒湖农场茶叶港草洲枯水期湿地植物与土壤关系及种群生态位分析. *生态学报*, 2017, 37(11): 3744-3754.
- [36] 赵彦坤, 张文胜, 王幼宁, 李科学, 贾会珍, 李霞. 高 pH 对植物生长发育的影响及其分子生物学研究进展. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 783-787.
- [37] 张剑, 王利平, 谢建平, 赵庭伟, 曹建军. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2455-2464.
- [38] 刘刚, 沈守云, 闫文德, 田大伦, 伍倩, 梁小翠. 洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征. *生态学报*, 2011, 31(24): 7625-7631.
- [39] Logsdon S D. Temporal variability of bulk density and soil water at selected field sites. *Soil Science*, 2012, 177(5): 327-331.
- [40] 朱芳, 白卓灵. 旅游干扰对鄱阳湖国家湿地公园植被及土壤特性的影响. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 33-39.
- [41] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 黄宝龙. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , E_h 及 pH 值的变化. *生态学报*, 2005, 25(1): 103-107.
- [42] Feyisa K, Beyene S, Angassa A, Said M Y, De Leeuw J, Abebe A, Megersa B. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. *CATENA*, 2017, 159: 9-19.
- [43] Bruland G L, Richardson C J. Comparison of soil organic matter in created, restored and paired natural wetlands in North Carolina. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(3): 245-251.
- [44] Ballantine K, Schneider R, Groffman P, Lehmann J. Soil properties and vegetative development in four restored freshwater depressional wetlands. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1482-1495.
- [45] 陈祥, 包兵, 胡艳燕, 朱本国. 再生水补水的人工湿地土壤理化特征研究. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1): 142-144.
- [46] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(7): 1898-1906.
- [47] Noe G B, Hupp C R, Rybicki N B. Hydrogeomorphology influences soil nitrogen and phosphorus mineralization in floodplain wetlands. *Ecosystems*, 2013, 16(1): 75-94.
- [48] Zapata-Rios, Rivero R G, Naja G M, Goovaerts P. Spatial and temporal phosphorus distribution changes in a large wetland ecosystem. *Water Resources Research*, 2012, 48(9): W09512.
- [49] 李玉凤, 刘红玉, 蔡春晓, 李玉玲, 孙一鸣. 城市湿地公园周边干扰对其水环境健康的影响——以西溪国家湿地公园为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 851-860.
- [50] 温璐, 董世魁, 朱磊, 施建军, 刘德梅, 王彦龙, 马玉寿. 环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响. *生态学报*, 2011, 31(7): 1844-1854.