

修复后临汾湿地公园土壤养分状况及沉积物污染特征

次瑞敏, 王莉, 可宇娜

(山西师范大学生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘要: 为探究汾河临汾段湿地土壤及沉积物的理化性质、养分含量, 评价土壤状况、预测水体的生态环境质量。共采集 98 个土壤及沉积物样本, 分析了理化性质及养分等 11 项指标。结果表明: 土壤 pH 在 7.0~8.4, 容重在 1.04~1.44 g/cm³, 含水率在 5.9%~17.5%, 电导率在 0.167~0.747 mS/cm, 质地类型包括壤黏土和黏壤土; 有机质、全氮、全磷含量分别为 8.7~39.8, 0.354~1.046, 0.389~1.444 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 12.9~50.3, 2.6~31.2, 86.4~329.2 mg/kg。经相关性分析可知, 土壤各指标与物理性质相关性较强; 沉积物各指标与质地显著相关, 且有机质、全氮、碱解氮、速效钾两两相关; 养分评价中, 有机质、全磷、速效磷处于 4 级水平, 全氮在 3~6 级均有分布, 碱解氮分布在 5, 6 级, 速效钾分布在 2, 3 级; 沉积物在有机污染评价中表现中度污染, 综合污染评价表现重度污染。

关键词: 湿地公园; 土壤; 沉积物; 养分; 评价

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2020)01-0371-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.053

Soil Nutrient Status and Sediment Pollution Characteristics of Linfen Wetland Park After Rehabilitation

CI Ruimin, WANG Li, KE Yuna

(College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000)

Abstract: The physiochemical properties and nutrient contents in wetland soils and sediments in the Linfen segment of Fenhe River were explored, the soil status was assessed, and the ecoenvironmental quality of water was predicted. Totally 98 samples of soils and sediments were collected, and 11 indices including physiochemical properties and nutrients were analyzed. It was found the soil pH was 7.0 ~ 8.4, bulk density was 1.04 ~ 1.44 g/cm³, water content was 5.9% ~ 17.5%, conductivity was 0.167 ~ 0.747 mS/cm, and soil texture types included loam clay and clay loam. The contents of organic matter, total N, total P, alkali-hydrolyzable N, available P, and available K were 8.7 ~ 39.8, 0.354 ~ 1.046, 0.389 ~ 1.444 g/kg, 12.9 ~ 50.3, 2.6 ~ 31.2, and 86.4 ~ 329.2 mg/kg, respectively. Correlation analysis showed that the indices of soils and sediments were significantly correlated with physical properties and textures respectively. Moreover, organic matter, total N, alkali-hydrolyzable N, and available K were correlated pairwise. Nutrient evaluation showed organic matter, total P and available P were at grade 4, total N was within grade 3 and 6, alkali-hydrolyzable N was at grade 5 and 6, and available K was at grade 2 and 3. The organic pollution degree of sediments was assessed as moderate, and the comprehensive pollution degree was evaluated as severe.

Keywords: wetland park; soil; sediments; nutrient; appraisal

湿地处于陆地系统和水生系统的交界处, 因具有涵养水源、蓄洪防旱、保障生态多样性等重要生态功能被誉为“地球之肾”^[1-2]。城市湿地与自然湿地相比, 处于城市中心或城市边缘, 由于城市人口聚集, 经济发展迅速, 所以城市湿地在环境调节方面意义更为

突出, 是城市生态系统的重要组成部分^[1,3]。随着中国城市化进程加快, 城市湿地受到严重破坏, 失去其原有功能, 湿地保护工作刻不容缓^[2-3]。2004年6月, 《关于加强湿地保护管理的通知》中明确提出, 湿地公园是湿地维护管理的一种重要形式。自我国第

收稿日期: 2019-07-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501203)

第一作者: 次瑞敏(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 895474610@qq.com

通信作者: 王莉(1963—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 578640017@qq.com

一个国家湿地公园—西溪国家湿地公园建设以来,截止到 2017 年底,全国有 31 个省(直辖市和自治区)已经建设了国家湿地公园,经批准的各种类型,不同级别的湿地公园 1 699 处,总面积达到 410.92×10^4 hm^2 ,有效缓解湿地保护的[4]。在湿地公园修复过程中,覆盖土多为人工修整、客土填埋堆叠后压实而来,养分含量较低[5]。而土壤养分与利用方式、修复措施等诸多可调控因素密切相关[6]。在湿地修复初期,由于覆盖土的结构稳定性及保水保肥的能力较差,土壤养分易被地表径流带走。所以准确了解土壤养分含量水平及空间分布,探究是否有养分流失的风险,也可制定相应的预防措施[7]。

临汾市尧都区汾河湿地公园作为百里汾河生态经济带的重点工程,该工程生态修复面积为 150 km^2 ,改造前,生活垃圾、建筑垃圾到处乱埋堆放,并私自搭建房屋,甚至出现断水的状况;修复后,以一条汾河河道为轴线,划分东西 2 个城市广场,24 个景观节点串联,于 2011 年全面开放,已经成为临汾人的“城市客厅”。近 10 年来,有学者对临汾汾河湿地进行学术研究。都勇海等[8]于 2013 年研究临汾市汾河公园东岸土壤速效养分表明,有机质、速效钾含量处于中等水平,而碱解氮、速效磷含量仍然匮乏状态;柴国丽等[9]于 2015 对临汾汾河湿地土壤速效养分及重金属污染进行评价,研究表明,肥力状况属于一般,以国家二级标准[9-10]为依据,根据内梅罗综合污染指数法,重金属水平未达到危害植物生长和人体健康的程度;杨平平[10]在 2017 年通过对汾河临汾段沉积物中重金属迁移转化规律进行研究,利用微生物修复法,植物修复法对汾河水生态系统重金属污染治理有显著效果。然而对于临汾湿地公园土壤的物理性质、全量养分状况、有效态重金属含量及沉积物理化性质未见报道。

综上所述,本研究以汾河临汾段湿地土壤及河床沉积物为研究对象,分析不同植被类型下土壤和河床沉积物的理化性质、养分含量,评价土壤和沉积物的生态环境质量,评价修建后临汾段汾河湿地功能及污染风险等级,为公园植被养护和城市湿地可持续发展提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汾河湿地位于山西省临汾城区汾河岸畔($35^{\circ}54'21''$ — $36^{\circ}19'48''\text{N}$, $111^{\circ}05'07''$ — $111^{\circ}49'04''\text{E}$),北至屯里大桥,南至 108 国道,全长 17 km。该研究区经改造,使得汾河东西治理宽度达到了 950 m,中间由坝隔开。西区保留原来河道,由 4 个橡胶坝控制泄洪。东区保

留其水分下渗功能,水源引入后由橡胶坝拦截,作为观赏。湿地两岸土壤上部(约 0—30 cm)为填埋的黄土母质,养分状况不明,下部为生活和建筑垃圾及原河流冲积物等。湿地在养护管理方面,以路为界,分区承包养护,包括补种替换、施肥、浇水、修剪、回收枯枝落叶等。

1.2 样品采集与处理

2018 年 8—10 月期间,经现场勘查后,以植被类型、植物根系深度和种植面积为参考,在河流东西两岸绿地进行土壤样品采集。选择的植被类型为 4 种:草本型、灌木型、乔木型、乔灌混交型(以下简称混交)。采样深度为 0—20,20—40 cm,每个采样点内“S”形取样,均匀混合后获得 1 个混合土样,同时用环刀采集原状土。采样时,用 GPS 记录采样点的经纬度,并记录采样点的植被类型、植被生长状况等基本信息。共计绿化区选择 62 个采样点,获得 62 个 0—20 cm 土样和 26 个 20—40 cm 土样。2018 年 4 月,在湿地东区河床沉积物疏浚过程中,采集 10 个沉积物样品。采样深度为 0—60 cm。采样点分布及采样基本信息见图 1 和表 1。

将采集的样本带回实验室后,剔除草根、碎石、枯枝等杂物后,自然风干,取部分风干土样研磨过 2, 1, 0.15 mm 尼龙筛后,装入密封袋,备用。

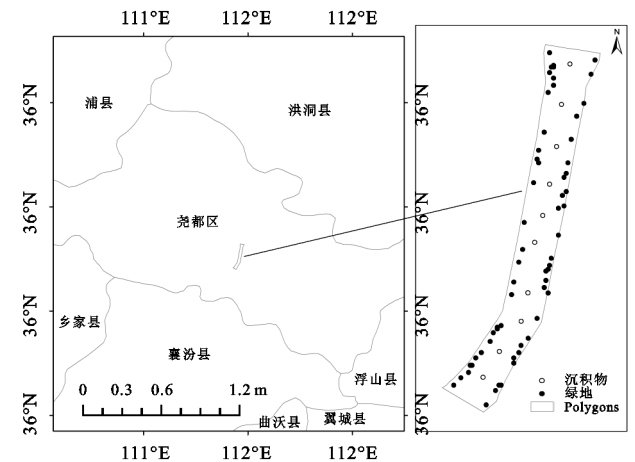


图 1 研究区位置及采样点分布

1.3 指标测定

在 2018 年 10 月至 2019 年 1 月,完成样品测试。测试指标及测定方法[11]为:pH 采用电位计法测定(水土比为 2.5 : 1);容重采用环刀法测定;含水率采用 105 °C 铝盒烘干测定;粒度分析采用比重计法测定;电导率采用电导率仪(雷磁 DDSJ—308F)测定;有机质采用 K_2CrO_7 — H_2SO_4 法测定;全氮和全磷用 H_2SO_4 、 HClO_4 联合消解后,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼蓝比色法测定;碱解氮采用扩散法测定,速效磷采用 NaHCO_3 法测定;速效钾采用 NH_4Ac 消

解,火焰光度法测定。

表 1 采样信息及植被种类

采样类型	采样深度/cm	植被类型及样点数				合计
		草本	灌木	乔木	混交	
绿地土壤	0—20	7	20	9	26	62
	20—40	5	7	9	5	26
	合计	12	27	18	31	88
主要植被类型	苜蓿、狗尾巴草、车轴草、黑麦草	石榴、果石榴、月季、木槿、大叶黄杨、榆叶梅、连翘、迎春、沙地柏	毛白杨、落叶松、塔柏、火炬、柳树、洋槐、油松、刺槐、云杉、紫叶李	月季石榴、垂柳、槐树、冬青、果石榴、山杏、臭椿、鹅绒藤、美人蕉、木槿、冬青卫矛、天目琼花、紫荆、核桃、落叶松、紫叶李、天人菊、黄刺玫、榆叶梅、丁香、珍珠梅、剑麻、黄杨球、柳树、黄杨、油松、碧桃、油松、山桃		
沉积物	0—60					10

1.4 数据处理

运用 ArcGIS 进行研究区概况绘制,所有数据均采用 Excel 2003 软件统计,采用 SPSS 17.0 软件分析。

1.5 综合肥力评价标准

1.5.1 绿地土壤养分含量评价 参照全国第二次土壤普查的养分分级标准^[9-10],确定汾河临汾段湿地土壤养分含量等级。

1.5.2 沉积物污染评价

1.5.2.1 综合污染指数评价

(1) 单项污染指数法

$$S_i = \frac{C_i}{C_s}$$

式中: S_i 为沉积物中评价指标 i 的污染指数; C_i 为评价指标 i 的实测值; C_s 为评价指标 i 的评价标准值,本文采用加拿大安略省环境和能源部(1992 年)发布的沉积物环境质量评价中能引起最低级别生态风险效应的总氮和总磷的评价标准值(0.55, 0.60 g/kg)^[12]。 S_i 大于 1 表明该指标含量超过评价标准值。

(2) 综合污染指数法

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}}$$

式中: FF 为综合污染指数; F 为 n 项污染指数的平均值($S_{\text{全氮}}$ 、 $S_{\text{全磷}}$ 的平均值); F_{\max} 为单项污染指数最大值($S_{\text{全氮}}$ 、 $S_{\text{全磷}}$ 的最大值)。结合沉积物综合污染指数评价标准^[11-12]可判断沉积物氮磷综合污染水平。

1.5.2.2 有机污染指数评价

由于近年来有机物、氮、磷的排放量增加,导致沉积物富营养化,而综合污染指数法没有把有机质对沉积物的污染考虑在内,所以为了完善沉积物污染评价结果,通过计算有机污染指数,结合沉积物有机指数评价标准,评价沉积物有机污染程度。计算公式^[12]为:

有机指数=有机碳浓度(%)×有机氮浓度(%)

有机碳浓度=有机质浓度(%)÷1.724

有机氮浓度=总氮浓度(%)×0.95

2 结果与分析

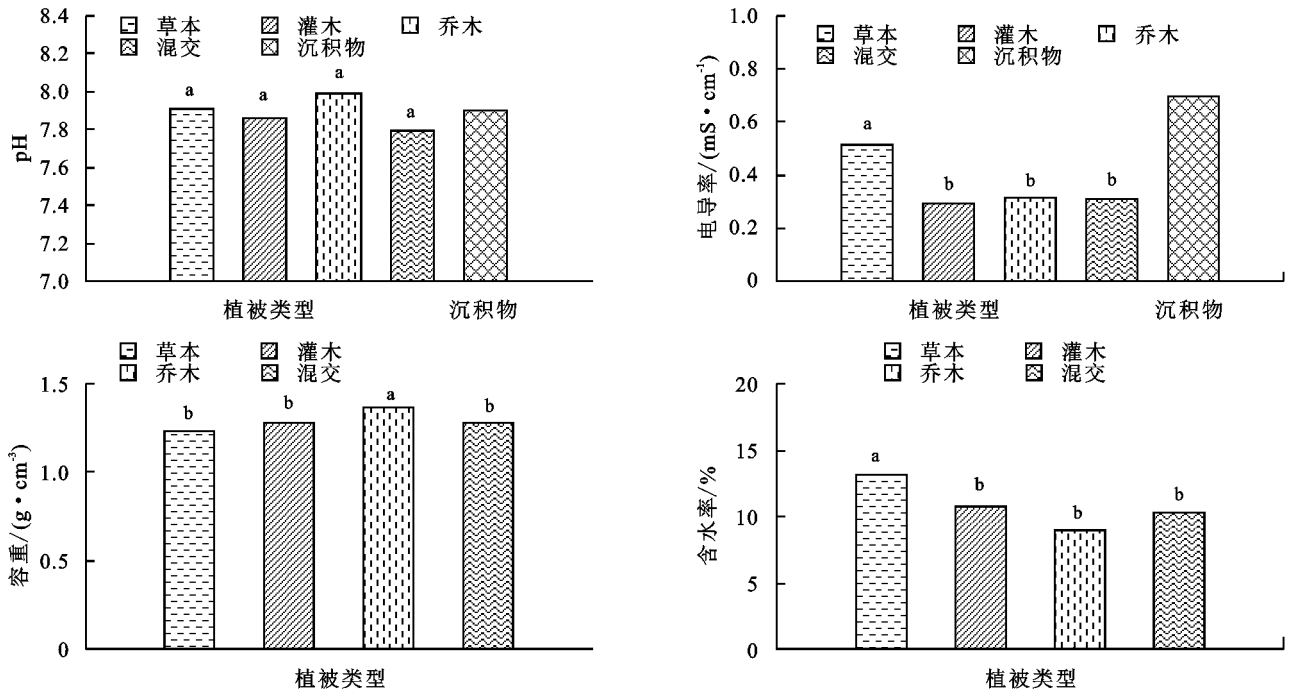
2.1 汾河湿地土壤及沉积物物理特征

由图 2 可知,汾河临汾段 0—20 cm 土壤 pH 为 7.0~8.4,草、灌、乔、混交 pH 均值分别为 7.9, 7.9, 8.0, 7.8,变异系数为 2.2%~4.5%,均表现为中性或微碱性。土壤容重范围为 1.04~1.44 g/cm³,草、灌、乔、混交容重均值分别为 1.23, 1.28, 1.36, 1.28 g/cm³,变异系数为 4.1%~9.3%。土壤含水率为 5.9%~17.5%,草、灌、乔、混交含水率均值分别为 13.1%, 10.7%, 9.0%, 10.3%,变异系数为 15.0%~24.9%。土壤电导率范围为 0.167~0.747 mS/cm,草、灌、乔、混交电导率均值分别为 0.516, 0.295, 0.316, 0.310 mS/cm,变异系数为 35.9%~47.9%,基本属于高变异性,说明各植被类型下土壤盐分含量差异较大。

湿地沉积物 pH 为 7.3~8.2,均值为 7.9,变异系数为 2.8%,电导率范围为 0.505~0.960 mS/cm,均值为 0.694 mS/cm,变异系数 21.86%,属弱变异性。

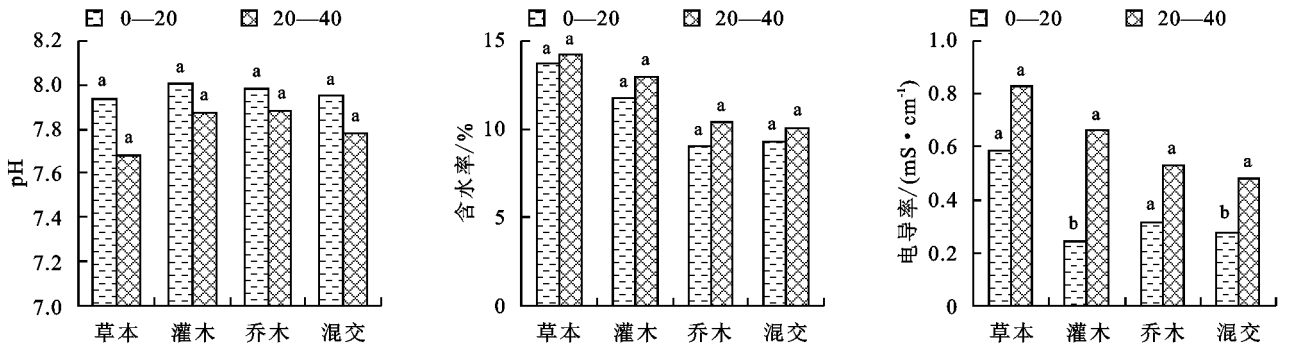
由图 3 可知,汾河临汾段不同植被下 0—20, 20—40 cm 土壤 pH 为 7.5~8.4, 7.3~8.3,表现出 0—20 cm 高于 20—40 cm 的趋势。土壤含水率为 9%~13.7%, 10.4%~14.2%,整体表现为 20—40 cm 大于 0—20 cm,与其他植被类型相比,草本含水率最高。土壤电导率为 0.242~0.585, 0.483~0.826 mS/cm,表现为 20—40 cm 高于 0—20 cm。

根据图 4 和图 5 不同植被类型下土壤各粒级的质量百分数,查阅国际制土壤质地分类^[16]可知,0—20 cm 草、灌、乔土壤均属于壤黏土,混交土壤属于黏壤土,沉积物属于粉砂质黏壤土。由图 5 可知,4 种植物类型土壤砂粒表现为 20—40 cm 高于 0—20 cm;草、灌、乔土壤在 0—40 cm 均属于壤黏土,混交属于黏壤土,但是各植被类型土壤各粒级含量属于中—高变异性。



注: 植被土壤为 0—20 cm 土层; 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$); 沉积物为 0—60 cm 土层; $n = 72$ 。

图 2 不同植被 0—20 cm 土壤及 0—60 cm 沉积物 pH、电导率、容重和含水率



注: $n = 26$

图 3 不同植被 0—40 cm 剖面土壤 pH、电导率、容重和含水率

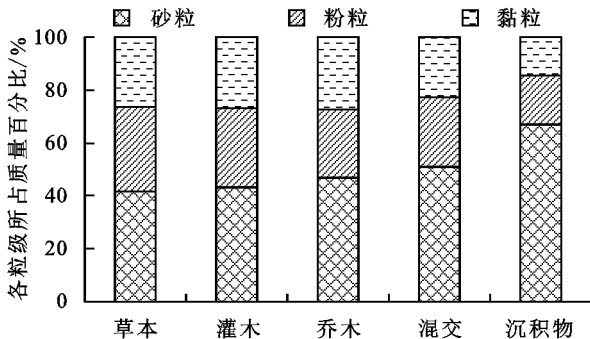


图 4 不同植被 0—20 cm 土壤及 0—60 cm 沉积物质地分析

2.2 汾河湿地土壤及沉积物养分特征

湿地不同植被下 0—20 cm 土壤养分见图 6。有机质含量整体范围为 8.7~39.8 g/kg, 草、灌、乔、混交有机质含量均值分别为 18.4, 16.3, 13.0, 20.7 g/kg; 变异系数为 21.7%~36.4%, 其中草本表现为强变异性; 经 ANOVA 分析, 4 种植被类型土壤有机质含量无显著性差异。全氮含量为 0.354~1.046 g/kg, 草、灌、乔、混交全氮含量均值分别为 0.719,

0.622, 0.686, 0.721 g/kg; 变异系数为 18.3%~20.4%, 均属于弱变异性; 4 种植被类型土壤全氮含量无显著性差异。全磷含量为 0.389~1.444 g/kg, 草、灌、乔、混交全磷含量均值分别 0.575, 0.642, 0.755, 0.559 g/kg; 变异系数为 19.4%~68.5%, 除草本外, 其他 3 种植被类型均表现出高变异性; 4 种植被类型土壤全磷含量无显著性差异。碱解氮含量为 12.9~50.3 mg/kg, 草、灌、乔、混交碱解氮含量均值分别为 36.0, 28.3, 29.9, 27.6 mg/kg; 变异系数为 17.4%~39.5%, 其中乔木表现出高变异性; 显著性差异表现为草本显著大于其他 3 种植被类型。速效磷含量为 2.6~31.2 mg/kg, 草、灌、乔、混交速效磷含量均值分别为 6.5, 7.7, 9.5, 8.0 mg/kg; 变异系数为 30.0%~76.4%, 除草本外, 其他 3 种植被类型均表现为高变异性; 4 种植被类型土壤速效磷含量无显著性差异。速效钾含量为 86.4~329.2 mg/kg, 草、灌、乔、混交速效钾含量均值分别为 135.5, 164.6, 157.6, 151.6 mg/kg; 变异

系数为 13.1%~33.6%，均表现为弱变异性；4 种植被类型土壤速效钾含量无显著性差异。

湿地不同植被下 0—40 cm 剖面土壤养分见图 7。独立样本 *T* 检验后,有机质含量在灌木土壤表现为 0—20 cm 显著高于 20—40 cm;全氮含量在乔木和混交土壤表现为 0—20 cm 显著高于 20—40 cm;全磷含量 0—20, 20—40 cm 土壤差异不显著;碱解氮含量在 4 种植被类型土壤中均表现出 0—20 cm 显著高于 20—40 cm;速效磷含量有 0—20 cm 高于 20—40 cm 趋势;速效钾含量在灌木和混交土壤表现为 0—20 cm 显著高于 20—40 cm。

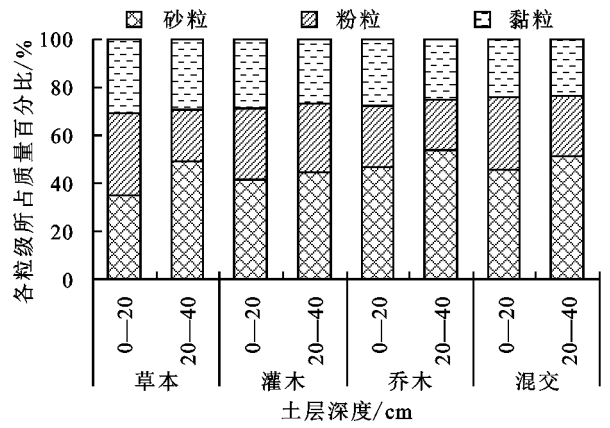
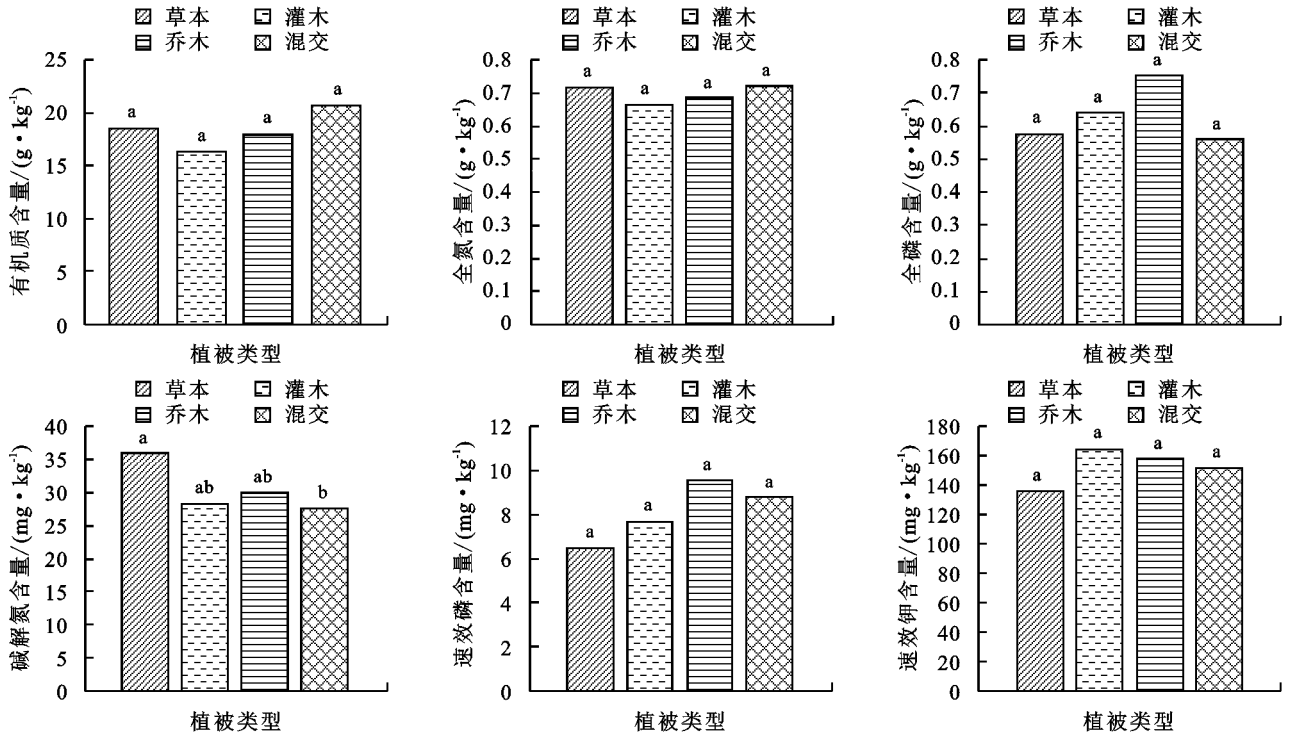


图 5 不同植被 0—40 cm 剖面土壤质地分析



注: *n* = 62

图 6 不同植被 0—20 cm 土壤养分状况

由图 8 可知,汾河湿地沉积物 6 种养分指标含量变幅为 14.1~67.3, 0.489~1.715, 0.543~0.952 g/kg, 21.4~93.3, 2.9~37.0, 98.8~271.1 mg/kg;均值为 37.9, 1.050, 0.701 g/kg, 64.0, 13.4, 175.3 mg/kg;变异系数为 40.4%, 33.2%, 19%, 39.6%, 71.1%, 31.5%。

2.3 绿地土壤、沉积物养分指标相关性分析

由表 2 可知, pH 与电导率、砂粒呈极显著负相关, 与黏粒呈极显著正相关; 容重与其他指标均无显著相关; 电导率除了与 pH, 与其他指标也均无显著相关; 含水率与砂粒呈极显著负相关, 与黏粒、粉粒呈正相关; 在质地中, 砂粒与粉、黏粒均呈极显著负相关, 粉粒和黏粒呈正相关; 有机质与砂粒呈极显著正相关, 与粉粒、黏粒呈显著负相关; 全氮与含水率呈正相关, 与砂粒呈极显著负相关, 与黏粒、碱解氮呈极显著正相关, 全磷与粉粒呈正相关; 碱解氮与含水率、粉

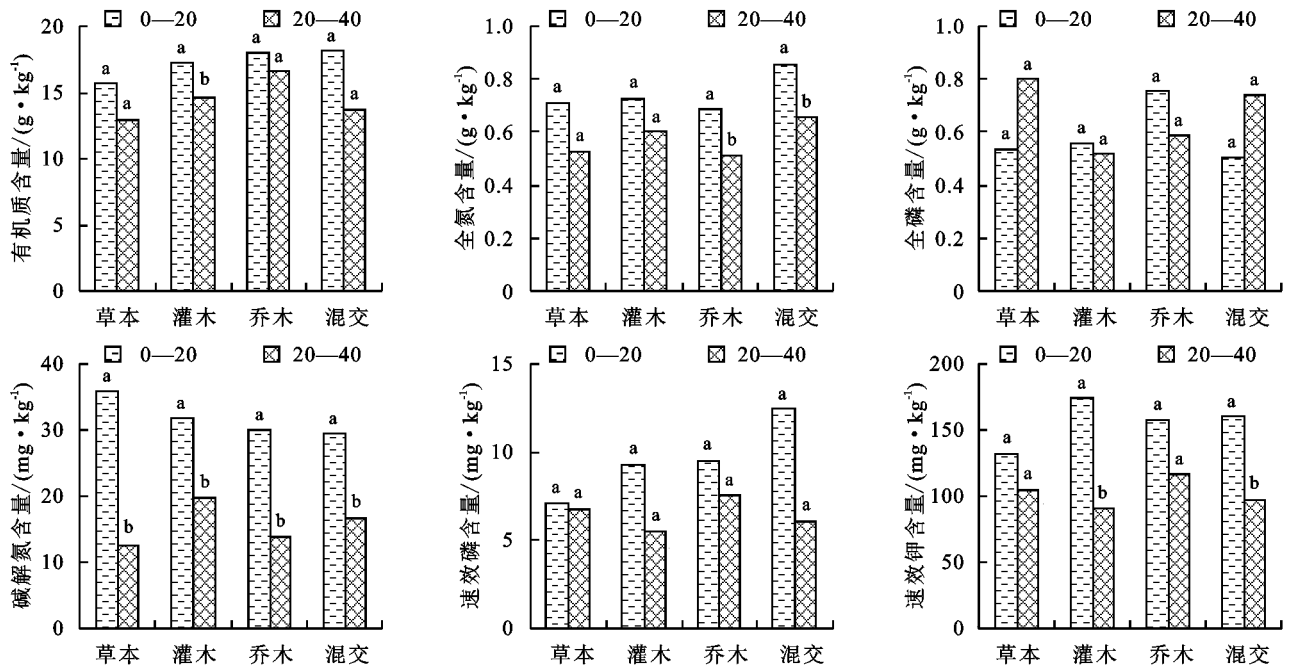
粒呈正相关, 与砂粒呈显著负相关; 速效磷与 pH 呈显著正相关; 速效钾与碱解氮、速效磷呈显著正相关。综上所述, 养分更容易受物理性质的影响。

由表 3 可知, 沉积物中 pH、电导率、黏粒、速效磷、全磷与其他指标均不相关; 砂粒与粉粒、有机质、全氮、速效钾呈极显著负相关; 粉粒与有机质、速效钾呈极显著正相关, 与全氮呈显著正相关; 有机质、全氮、碱解氮、速效钾, 两两之间均呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 可以理解为这 4 种养分具有同源性。

2.4 绿地土壤及沉积物养分评价

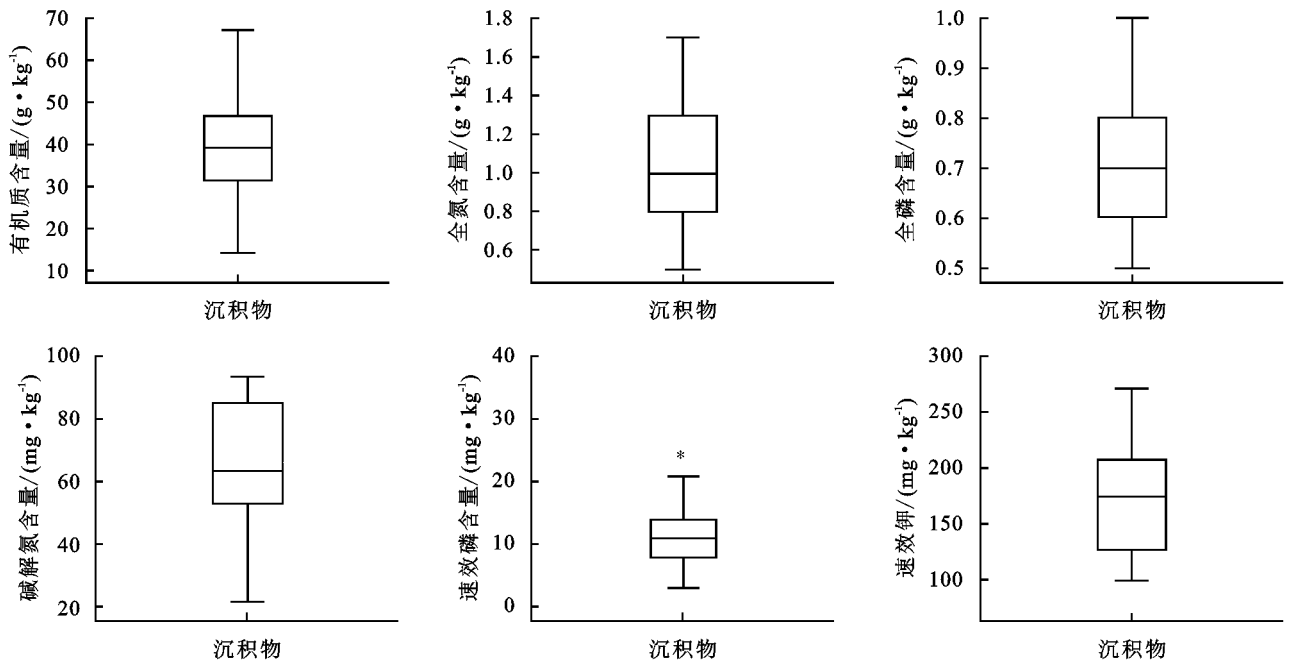
2.4.1 绿地土壤养分评价 参照全国第二次土壤普查的养分分级标准^[9-10], 分析本试验土壤养分级别分布。由图 9 可知, 土壤有机质将近 70% 处于 4 级及以下水平, 个别样点有机质含量落在 2 级水平; 土壤全氮含量分布在 4~6 级; 土壤碱解氮含量全部在 5, 6 级范围; 土壤全磷含

量基本分布在 3,4 级;速效磷含量在 2~6 级均有分布;土壤速效钾含量基本都分布在 1~3 级,少量分布在 4 级。



注: $n=26$

图 7 不同植被 0—40 cm 土壤养分状况



注: —最大值; —为中位数; 框体上下两端为上(下)四分位; * 为异常数值有误; $n=10$ 。下同。

图 8 沉积物养分状况分析

2.4.2 汾河湿地沉积物污染状况评价 通过公式计算沉积物有机污染和综合污染指数,结合评价标准可知,汾河湿地公园沉积物有机污染情况属于中度污染,而综合污染情况达到 4 级,属于重度污染(表 4)。

3 讨论

3.1 湿地公园土壤理化性质及养分含量评价

由图 2 可知,湿地土壤 pH 在 0—20,20—40 cm 均表现为中性或微碱性,不同植被下土壤 pH 属弱变异,说明湿地土壤符合常规植物健康生长的立地

条件,0—20,20—40 cm 土壤 pH 在数值上的变化说明土壤异质性。土壤容重是表征土壤孔隙度和颗粒大小的指标^[13],植物根系正常生长的容重范围为 1.14~1.26 g/cm³^[14],4 种植被土壤均有部分样点超出正常生长范围,最高已经达到 1.39,1.44 g/cm³,尤其在乔木表现最明显,本公园的乔木多在路边和座椅附近,形成了公园遮荫的景观现象,游人多出现在这里,对土壤的踩踏导致土壤紧实度增大。湿地土壤含水率在草本表现最高,最大原因是草本种植

密集,盖度大,有效防止水分蒸发;其次公园在养护过程中,草坪处于不断维护更新状态,修建喷灌;20—40 cm 土壤含水率表现出比 0—20 cm 高的趋势,因为有机质在表层积累,孔隙度大,有利于渗水,也有利于水分的保持和植被对水分的利用。湿地 0—20 cm 土壤电导率最高值为 0.747 mS/cm,20—40 cm 土壤电导率最高值达到 1.144 mS/cm,从均值也可以看出,

20—40 cm 土壤有盐分积累的现象,但是均没有超过正常生长范围浓度,本研究采样时正值秋季,有研究^[15]表明,秋季为返盐明显季节,所以推测土壤含盐量可能比真实值偏高一些。湿地草、灌、乔土壤属于壤黏土,混交土壤属于黏壤土,但变异系数各植被类型土壤各粒级含量变异系数较高,人为影响导致土壤质地更复杂。

表 2 土壤各指标相关性分析

指标	pH	容重	含水率	砂粒	粉粒	黏粒	有机质	全氮	全磷	碱解氮	速效磷	速效钾
pH	1.000											
容重	0.078	1.000										
电导率	-0.372 **	-0.076										
含水率	0.168	-0.175	1.000									
质地	砂粒	-0.435 **	-0.206	-0.414 **	1.000							
	粉粒	0.231	0.125	0.251 *	-0.885 **	1.000						
	黏粒	0.541 **	0.239	0.482 **	-0.880 **	0.557 **	1.000					
有机质	-0.085	-0.245	-0.009	0.401 **	-0.325 *	-0.384 **	1.000					
全氮	0.221	0.133	0.320 *	-0.303 *	0.171	0.366 **	0.157	1.000				
全磷	-0.047	0.113	0.005	-0.166	0.250 *	0.04	0.012	0.066	1.000			
碱解氮	0.202	-0.131	0.272 *	-0.286 *	0.297 *	0.206	-0.005	0.351 **	0.206	1.000		
速效磷	0.250 *	-0.022	-0.088	-0.151	0.159	0.106	-0.065	0.179	0.089	0.239	1.000	
速效钾	0.108	0.113	-0.013	-0.054	0.022	0.074	-0.218	0.074	0.08	0.264 *	0.258 *	1.000

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。下同。

表 3 沉积物各指标相关性分析

指标	pH	电导率	砂粒	粉粒	黏粒	有机质	全氮	全磷	碱解氮	速效磷	速效钾
pH	1.000										
电导率	0.389	1.000									
质地	砂粒	0.299	0.255	1.000							
	粉粒	-0.225	-0.262	-0.986 **	1.000						
	黏粒	-0.331	-0.037	-0.378	0.219	1.000					
有机质	0.078	-0.379	-0.838 **	0.804 **	0.437	1.000					
全氮	0.12	-0.472	-0.771 **	0.756 *	0.314	0.936 **	1.000				
全磷	0.585	-0.106	-0.114	0.073	0.263	0.279	0.115	1.000			
碱解氮	0.168	-0.126	-0.653	0.604	0.469	0.810 **	0.816 **	0.424	1.000		
速效磷	0.073	-0.077	-0.204	0.116	0.552	0.497	0.457	0.262	0.568	1.000	
速效钾	-0.122	-0.11	-0.822 **	0.790 **	0.428	0.943 **	0.893 **	0.096	0.810 **	0.537	1.000

由图 6 和图 7 可知,湿地不同植被 0—20 cm 土壤各养分指标,除碱解氮表现为草本显著高于混交外,其他指标均无显著差异;湿地不同植被 20—40 cm 土壤各养分指标(除速效磷外)均表现出不同程度的表聚性。可能与植物地上部分枯枝落叶层的厚度及根系向下伸长密切相关,植物根系从深层土壤中吸收养分,然后再通过枯枝落叶等形式将部分养分归还于表层土壤并提供丰富的养分,同时深层土壤含量逐渐减少,形成明显的生物富集和表聚性的现象^[17-18]。

在各项指标相关性中,湿地土壤容重范围基本都是正常范围,只有少数偏高,因此相似的容重并没有影响其他因素,并且影响也不大,所以没有产生相关

性。含水率与砂粒呈极显著负相关,与粉粒和黏粒呈正相关,可见土壤质地类型影响了土壤水分的保持。有机质与砂粒呈极显著正相关,与粉粒和黏粒表现负相关,这与张枝枝等^[19]、罗先学等^[20]研究结果不一致,可能是由于研究区覆盖土属黄土母质,主要以粗粉粒为主,而湿地公园在前期发展过程中,会适当施肥以及人为管理,导致有机质含量增加。全氮与砂粒表现显著负相关,与黏粒表现显著正相关,是由于砂粒利于通气,便于全氮的转化,这与邓廷飞等^[21]研究结果一致。速效钾与碱解氮、速效磷呈显著正相关,这是土壤的成土作用,枯枝落叶分解释放了速效氮磷钾。

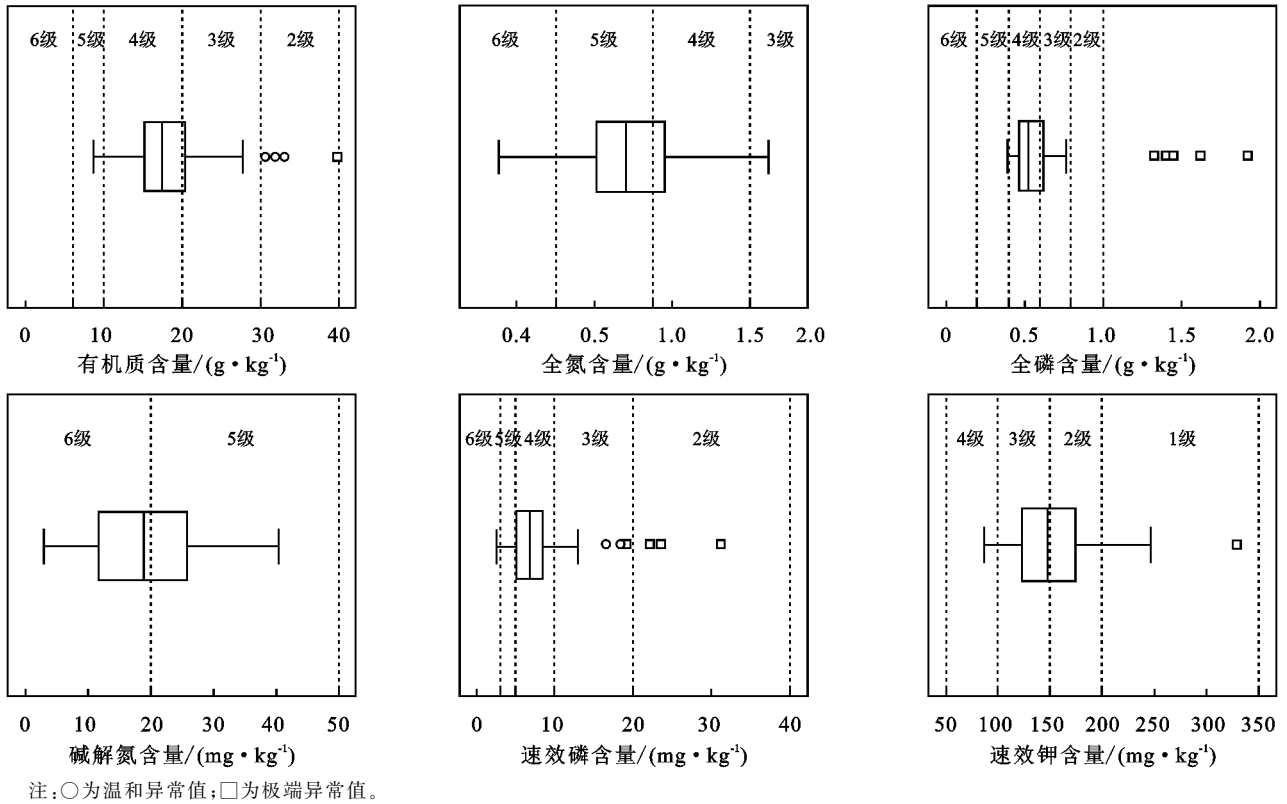


图 9 湿地公园绿地土壤养分级别分布

表 4 汾河湿地公园沉积物污染评价

	计算值	等级	类型
有机污染评价	0.219	Ⅲ	中度污染
综合污染评价	2.689	Ⅳ	重度污染

养分评价中,有机质、全磷、速效磷处于 4 级水平,全氮在 3~6 级均有分布,碱解氮分布在 5,6 级,速效钾分布在 2,3 级,总之,除了全氮和碱解氮处于低水平,其他养分均表现不缺乏或丰富状态。与都勇海等^[8]的结果相比,有机质、速效磷、速效钾含量有所提高,碱解氮含量处于低水平。与黑河自然与保护区

表 5 湿地公园绿地土壤与沉积物养分含量与其他城市湿地公园相比

采样区	其他公园	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考 文献
绿地 土壤	临汾汾河湿地	14.6~22.8	0.576~0.811	0.546~0.860	25.5~38.6	5.1~11.7	132.3~181.3	本研究
	临汾汾河公园	14~17			27~50	1.1~2.1	53.83~62.64	8
	桂林市仙喀斯特湿地	6.46~24.09	0.93~2.93	0.303~0.539	34.4~188.3	2.05~3.91		22
	河北坝上闪电河人工湿地	60.41	1.99	0.17	73.5	3.88	146.03	23
	黑河自然保护区湿地	14.49			0.220	0.014	15.47	18
	艾比湖湿地	8.23~12.31	0.49~1.17	0.66~1.25				24
	三江平原典型湿地	10.32~63.57	0.88~6.58	0.38~1.37				25
	东洞庭湖湿地	15.11	0.8	0.65	70.58	13.24	71.6	17
	乌裕尔河滨湿地	52.9~81.3			136.8~275.9	191.5~248.1	89.9~236.1	26
	潘阳湖国家湿地	14.1	1.06	0.73	36.03	6.81	294.6	27
沉积物	临汾汾河湿地	37.863	1.050	0.701	63.986	13.353	175.280	本研究
	东太湖滨岸区湖滨湿地	30.7	3.5	0.195				28
	竺山湾湖滨湿地	30.9	4.1	0.954				29
	竺山湾缓冲带内湿地	29.8	1.42	0.44				29

湿地^[18]相比,有机质水平相当,氮磷钾含量均远超自然保护区,说明人为修复行为对湿地土壤养分有良好恢复效果;与其他城市人工湿地^[17,22-27]相比,本研究土壤养分中有机质、速效钾含量丰富,碱解氮、速效磷、全氮、全磷均处于中等水平。

3.2 湿地公园沉积物评价及来源分析

本研究区沉积物各养分含量与其他湿地沉积物相比(表 5),水平相当,但是有机污染评价和综合污染评价情况不容乐观。高含量的有机质及氮磷钾,可推测水体有富营养化的现象。

分析沉积物污染来源可能原因为:汾河水从上游流至汾河断面时分开,西区作为原始河道,调节橡皮坝起到泄洪功能,东岸河流属于观光作用,橡皮坝长期属于抬高状态,水流平缓,河流颗粒物发生沉降,将养分带到沉积物中;受地理位置影响,临汾处于临汾谷地,汾河湿地公园地势相对偏低,降雨降雪会淋洗城市大气颗粒物、冲洗建筑物、地面的废渣或垃圾而形成城市径流污水;而且在前期对研究区进行调查时发现,在东河道边上,每间隔 500 m 左右,留有 1 个排水口,经问询得知,城市径流污水从排水口流入汾河,经过日积月累的沉降,可能造成沉积物的养分积累。所以,在沉积物管理方面,定期清淤可以增加河道的蓄水量和排洪能力,同时清淤的物质,可以作为园林修复的土壤母质使用。

4 结论

(1)两岸土壤 pH 在 7.0~8.4,酸碱度适宜;容重为 1.04~1.44 g/cm³,部分略高;含水率适中;电导率为 0.167~0.747 mS/cm,在植物正常生长范围浓度;质地类型包括壤黏土和黏壤土。沉积物 pH 为 7.3~8.2,电导率为 0.505~0.960 mS/cm;质地属于粉砂质黏壤土。

(2)土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 8.7~39.8,0.354~1.046,0.389~1.444 g/kg,12.9~50.3,2.6~31.2,86.4~329.2 mg/kg,不同植被类型 0—20 cm 土壤没有表现出养分差异;0—20 cm 土壤较 20—40 cm,表现不同程度的表聚性。沉积物 6 种养分含量为 37.9,1.050,0.701 g/kg,64.0,13.4,175.3 mg/kg。

(3)经相关性分析可知,土壤更容易受物理性质影响;沉积物受质地影响较大,且有机质、全氮、碱解氮、速效钾这 4 种养分具有同源性。

(4)养分评价中,土壤除了碱解氮和全氮处于低水平,其他养分均表现不缺乏或丰富状态;沉积物在有机污染评价中表现中度污染,综合污染评价表现重度污染。

(5)公园管理过程中,目前在枯枝落叶处理方面,是定期集中到一起堆埋,容易造成局部养分偏高现象,也可考虑减少收集枯枝落叶的频率,避免造成养分不均现象;土壤养分目前恢复状况良好,只有氮含量处于低水平,可多种豆科植物,提高固氮能力,其次公园目前使用有机肥,本研究也可作为施肥提供数据参考;增加并改进喷灌设备,避免盲区而造成局部缺水;合理降低橡皮坝高度使水体流通,避免富营养化,并减轻恶臭味;加大公园科普、宣传和教育、科研监测的力度,加强对娱乐休闲人群的管理。

参考文献:

- [1] 张彪,史芸婷,李庆旭,等.北京湿地生态系统重要服务功能及其价值评估[J].自然资源学报,2017,32(8):1311-1324.
- [2] 邵媛媛,周军伟,母锐敏,等.中国城市发展与湿地保护研究[J].生态环境学报,2018,27(2):381-388.
- [3] 张慧,李智,刘光,等.中国城市湿地研究进展[J].湿地科学,2016,14(1):103-107.
- [4] 杨永峰,张晓云,郝敏,等.供给侧改革视角下中国国家湿地公园建设研究[J].湿地科学,2018,16(2):165-170.
- [5] Gałsiorek M, Kowalska J, Mazurek R, et al. Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) [J]. Chemosphere, 2017, 106(3): 148-158.
- [6] 于兴修,马骞,刘前进,等.不同覆被土壤结构稳定性对侵蚀泥沙氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):12-16.
- [7] 张晓凤,张旭,李广贺.城市新建生态公园土壤养分空间变异性:以北京奥林匹克森林公园为例[J].清华大学学报,2013,53(1):90-95.
- [8] 都勇海,邵丽华,王莉.修建后的临汾汾河公园土壤养分评价[J].山西师范大学学报,2014,28(1):84-87.
- [9] 柴国丽,张永清,冀晴,等.临汾市汾河公园东岸不同区域绿地土壤肥力特征比较研究[J].黑龙江农业科学,2016,39(8):39-44.
- [10] 杨平平.山西省农业水生态系统重金属污染实证研究:以汾河沉积物为研究对象[J].中国农业资源与区划,2017,38(4):141-147.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2011:1-495.
- [12] 王书锦,刘云根,张超,等.洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J].湖泊科学,2017,29(1):69-77.
- [13] Wang H, Piazza S C, Sharp L A, et al. Determining the spatial variability of wetland soil bulk density, organic matter, and the conversion factor between organic matter and organic carbon across coastal Louisiana, USA. [J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(3): 507-517.
- [14] 陈洪,付强,胡艳燕,等.重庆市主城区城市绿地土壤质量特征分析及评价[J].贵州科学,2015,33(4):69-74.
- [15] 王小雷,杨浩,赵其国,等.云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录[J].沉积学报,2010,28(4):776-782.
- [16] 黄昌勇.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 赵丹丹.东洞庭湖湿地土壤养分状况及其评价[D].长沙:湖南师范大学,2016.
- [18] 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[J].草业学报,2017,26(5):15-28.

4 结论

(1)在共沉淀剂的配比为 1 : 2.5、投加量 1 : 1(体积比)、pH 为 9 时反应 60 min,有机质的去除效果最佳,出水有机质的浓度为 53 mg/L,有机质去除率达 93%以上。

(2)含 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等正电离子的共沉淀剂对带负电荷的有机质具有电荷吸引和络合和部分吸附作用,可使有机物与共沉淀剂形成共沉淀而从沼液中去掉。

(3)共沉淀工艺操作简便、高效,在沼液有机物去除和其他有机废水处理方面具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 徐铭泽,孙丽英,张良,等.沼液与化肥配施对西红柿生长和土壤组分的影响[J].中国沼气,2017,35(6):75-82.
- [2] 孙秀艳.第一次全国污染源普查结果发布[N/OL].(2010-02-10)[2019-06-13].<http://cpc.people.com.cn/GB/64093/82429/83083/10962959.html>.
- [3] 中华人民共和国生态环境保护部.全国环境统计公报(2015)[R].(2017-02-23)[2019-07-10].http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/qqhjtjgb/201702/t20170223_397419.shtml.
- [4] 张春,郑利兵,郁达伟,等.沼液处理与资源化利用现状与展望[J].中国沼气,2018,36(5):36-46.
- [5] 郜玉环,张昌爱,董建军.沼渣沼液的肥用研究进展[J].山东农业科学,2011(6):71-75.
- [6] 刘荣厚,郝元元,叶子良,等.沼气发酵工艺参数对沼气及沼液成分影响的实验研究[J].农业工程学报,2006,22(S1):85-88.
- [7] 粟萍,赵靓,高英杰,等.不同有机肥配施沼液对葡萄产量和品质的影响[J].新疆农业科学,2014,51(4):768-776.
- [8] 杨静,徐秀银.施用沼液对生菜产量及土壤质量的影响[J].中国沼气,2013,31(6):51-54.
- [9] 黄界颖,伍震威,高连芬,等.沼液对土壤质量及小白菜产量

品质的影响[J].安徽农业大学学报,2013,40(5):849-854.

(上接第 379 页)

- [19] 张枝枝,张福平,燕玉超,等.渭河两岸缓冲带的土壤有机质含量分布特征及其影响因子[J].土壤,2017,49(2):393-399.
- [20] 罗先学,彭德元,王振华,等.慈利植烟土壤养分状况评价及其与土壤质地的关系[J].作物研究,2015,29(3):284-289.
- [21] 邓廷飞,刘彦,颜秋晓,等.贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J].水土保持学报,2014,28(5):209-214.
- [22] 周龙武,黄玉清,王新贵,等.桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤微生物数量动态分析[J].广西植物,2017,37(6):685-693.
- [23] 于连海,赵晓辉,王留成,等.河北坝上闪电河湿地土壤养分分布特征[J].林业与生态科学,2018,33(2):31-37.
- [24] 方丽章,李艳红,李发东,等.艾比湖湿地土壤水分一盐

- [10] 陈永杏,董红敏,陶秀萍,等.猪场沼液灌溉冬小麦对土壤质量的影响[J].中国农学通报,2011,27(3):154-158.
- [11] 王敏锋,严正娟,陈硕,等.施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(7):1351-1359.
- [12] 郑学博,樊剑波,周静,等.沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J].土壤学报,2016,53(3):675-684.
- [13] 黄继川,徐培智,彭智平,等.基于稻田土壤肥力及生物学活性的沼液适宜用量研究[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):362-371.
- [14] 郑学博,樊剑波,周静.沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2015,48(16):3201-3210.
- [15] 张无敌,尹芳,李建昌,等.沼液对土壤有机质含量和肥效的影响[J].可再生能源,2008,26(6):45-47.
- [16] 陈超,阮志勇,吴进,等.规模化沼气工程沼液综合处理与利用的研究进展[J].中国沼气,2013,31(1):25-28,43.
- [17] 杨治斌,吕旭东.浙江省沼液利用现状与推进机制探讨[J].浙江农业科学,2014(11):1665-1668,1673.
- [18] 隋倩雯.氨吹脱与膜生物反应器组合工艺处理猪场厌氧消化液研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [19] 徐国锐,石伟.沼液高值化利用研究进展[J].科技通报,2012,28(7):165-168,181.
- [20] 马金华,张万明.阳离子型聚丙烯酰胺絮凝马铃薯深加工工艺蛋白废液的研究[J].安徽农业科学,2011,39(12):7083-7084,7087.
- [21] 张万明,陈开陆,黄娟,等.马铃薯深加工工艺废液化学絮凝研究[J].光谱实验室,2009,26(6):1490-1495.
- [22] 李亚红,高世扬,朝志萍,等.Pitzer 混合参数对 $\text{HCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系 25 °C 时溶解度预测的影响[J].应用化学,2001,18(2):155-157.
- [23] 分一养分空间异质性分析[J].农业环境科学学报,2019,38(1):157-167.
- [25] 肖焯,黄志刚,武海涛,等.三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J].环境科学,2015,36(5):1842-1848.
- [26] 李勇,韩勤,刘新宇,等.乌裕尔河滨河湿地不同退耕还湿方式下土壤养分恢复特征[J].湿地科学,2016,14(4):586-589.
- [27] 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[J].水土保持研究,2015,22(3):33-39.
- [28] 王莹,胡维平.太湖湖滨湿地沉积物营养元素分布特征及其环境意义[J].中国环境科学,2015,35(1):204-210.
- [29] 魏伟伟,叶春,李春华.太湖竺山湾缓冲带内湿地表层沉积物氮、磷和有机质的分布特征及评价[J].环境污染与防治,2018,40(5):588-591.