

七星湿地土壤磷的时空分布特征研究

潘俊,方永荟

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究七星湿地土壤磷的时空分布特征,掌握七星湿地土壤中磷质量分数的变化规律。方法 在枯水期和丰水期分别对七星湿地的典型区域内进行取点采样,通过碱融钼锑抗比色法对土壤中的总磷进行测定,通过 SMT 分级分离方法对无机磷(IP)、有机磷(OP)、NaOH-P、HCl-P 的质量分数进行分析,得到每份土壤样品中总磷的质量分数以及有机磷无机磷所占总磷的比例。结果 湿地上游土壤中总磷的质量分数始终小于湿地下游。湿地土壤中总磷质量分数从湿地上游到下游逐渐减小。从土壤表层到深层总磷质量分数逐渐减小,随着土壤深度的增加总磷减小的速率会变慢。七星湿地土壤中以无机磷为主。在丰水期植物可以减少总磷的质量分数,而在枯水期植物的残体反而会增加总磷的质量分数。结论 湿地对土壤中的磷具有一定的净化作用,湿地中的植物对土壤中磷的时空分布具有比较明显的影响。

关键词 七星湿地;土壤;磷;时空分布

中图分类号 TU991

文献标志码 A

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus in Soil of Qixing Wetland

PAN Jun, FANG Yonghui

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The temporal and spatial distribution characteristics of phosphorus in soil was studied to the variation law of phosphorus concentration in soil of Qixing Wetland. Soil samples were taken in the typical area of Qixing Wetland during the dry season and the wet season. The mass concentration of total phosphorus was determined by the alkali fusion molybdenum antimony colorimetric method. And the mass concentration of the inorganic phosphorus (IP), organic phosphorus (OP), NaOH-P, and HCl-P in the samples was analyzed by the SMT fractionation method. According the total mass concentration of phosphorus, the ratio of organic phosphorus and inorganic phosphorus to total phosphorus, the mass concentration of total phosphorus in the upper reaches of the wetland is always lower than that in the lower reaches of the wetland. The mass

收稿日期:2021-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51908377)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士,主要从事环境工程方面研究。

concentration of total phosphorus in wetland soil gradually decreases from the upstream to the downstream of the wetland and from the surface of the soil to the deep layer. And the decrease rate is slow down with the depth of the soil increase. The soil of Qixing Wetland is dominated by inorganic phosphorus. Plants can reduce the content of total phosphorus in the wet season, while plant residues in the dry season will increase the content of total phosphorus. Wetland has a certain purification effect on the phosphorus in the soil, and plants in the wetland have a relatively obvious impact on the temporal and spatial distribution of phosphorus in the soil.

Key words: Qixing Wetland; soil; phosphorus; temporal and spatial distribution

湿地生态系统是地球上三大生态系统的重要组成部分^[1]。湿地生态系统在净化水体、保障生物多样性和为人类提供生产、生活资源等方面发挥着重要作用^[2-3],湿地还具有重要的污水处理和资源恢复的功能^[4]。我国湿地面积广阔,但随着经济的快速发展,我国湿地面积逐年减小,湿地被污染现象日趋严重,湿地生态功能也随之退化。磷元素是湿地发生富营养化的重要因子之一^[5]。湿地中的磷既可以从水体中迁移转化到土壤中,也能在一定条件下由土壤进入到湿地土覆水体中^[6]。因此,在自然条件和人类活动的影响下,湿地不同区域的土壤中总磷的质量分数以及其各形态比例是不同的,湿地土壤中的磷在不同区域的分布情况反过来又会对湿地中微生物群落的分布以及植物的生长状况产生影响^[7]。因此,研究磷在湿地的时空分布是研究磷在湿地水体土壤沉积物迁移转化的前提。刘吉平等^[8]对三江平原环形湿地的土壤养分的空间分布规律进行了研究,发现湿地土壤中全磷的质量分数自上而下分布的规律会随湿地中优势物种的不同而发生变化。S. Grunwald 等^[9]在佛罗里达一亚热带湿地中采样,分析了其土壤中全磷的空间变异性及分布规律。谢莹^[10]发现在黄河的自然湿地和恢复湿地土壤中的总磷的质量分数并不一致,在土壤各形态磷中,无机磷占比最大。可见国内外研究主要是对湿地水体和沉积物中磷的分布,关于湿地土壤中磷的分布情况的相关探索较少。探究湿地的对象是以河口、湖泊周边形成的湿地为主,缺少

由于水库蓄水而产生的湿地。鉴于此,笔者选择七星湿地中土壤磷的时空分布特征进行研究,并分析湿地植被对土壤中磷分布的影响。

1 试 验

1.1 样品的采集与处理

七星湿地位于石佛寺水库库区南部,修建的目的是进一步减少下游辽河水体的污染^[11]。辽河支流中的西小河、万泉河、长河和羊肠河汇入七星湿地中。石佛寺水库库区内部有黄家水源地和农高科水源地,是沈阳市沈北新区的主要水源地^[12](见图1)。一旦七星湿地中磷等污染物质量分数过高,必然会对水源地的水质造成影响。同时,由于水库有在枯水期放水丰水期蓄水的特性,会对磷的分布产生影响。所以选择七星湿地作为研究对象,一方面可以研究磷在七星湿地中迁移转化的规律,另一方面也可以为保障水源地供水安全提供理论支持。

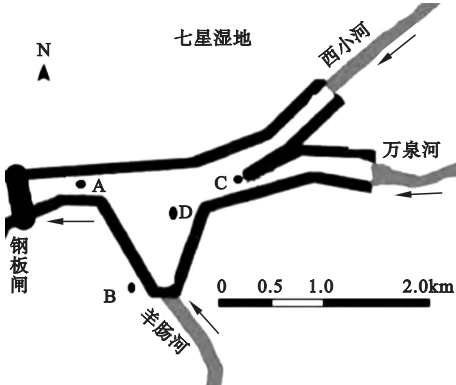


图1 采样地点图

Fig. 1 Sample geographic location

在七星湿地内选取4个采样点来对磷的时空分布进行研究。分别在2020年3月份的枯水期和2020年7月份的丰水期进行取样,两次取样的地点保持一致。采样点区位如表1所示。

表1 采样点具体区位表

Table 1 Specific location table of sampling points

采样点 编号	方位	描述
A	123°46'57.72"(E)	位于湿地下游断面,缺少植被
	42°14'83.08"(N)	
B	23°48'32.27"(E)	位于湿地下游断面,植被丰富。
	42°13'86.66"(N)	
C	123°50'12.20"(E)	位于三河汇合之处
	42°14'78.78"(N)	
D	123°48'72.29"(E)	位于湿地中心
	42°14'62.82"(N)	

取表层和埋深40 cm、80 cm、120 cm、160 cm的土样,表层土样采用蚌式采样器进行采样,其余土样采用柴油土壤取样器进行采样,每一深度需要取3份样品。土样装入自封袋中,在实验室中自然风干,剔除其中的杂质后过筛用于土样中磷质量分数的检测。

为了研究植物对七星湿地土壤磷的时空分布的影响,在植物生长茂盛的采样点B处对湿地中最主要的植物芦苇进行采集。将挖出的芦苇放入保鲜袋中。采集回来的芦苇先用自来水进行冲洗,冲洗掉植物表面的杂质,再用去离子水进行冲洗。

1.2 土壤中磷的测定

(1) 土壤中总磷的测定

采用碱熔钼酸盐分光光度法测定土壤中的总磷质量分数。

(2) 土壤中无机磷测定

用Reedy化学连续提取法提取土壤中的无机磷。称取0.5 g土样。放到50 mL的离心管中,并在离心管中加入25 mL浓度为1 mol/L HCl溶液。放入到恒温振荡培养箱中以150 r/min振荡3 h,6 000 r/min离心

10 min。最后用0.45 μm滤膜进行抽滤,取上清液用钼酸铵分光光度法测定磷质量分数。

(3) 土壤中有有机磷测定

采用SMT分级法测定土壤中有有机磷的质量分数。称量0.2 g土样倒入离心管,加入20 mL浓度为1 mol/L的HCl溶液,在恒温培养箱中在25℃以150 r/min振荡16 h。将样品以2 000 r/min离心15 min,将上清液弃置。用12 mL的去离子水清洗离心过后的样品,振荡5 min后用2 000 r/min离心15 min,弃去洗液,洗涤两次后的残渣转入坩埚,将坩埚放入水浴锅中水浴直至样品干燥,再放到马弗炉中450℃灼烧3 h。冷却后倾倒至离心管,用20 mL浓度为1 mol/L的HCl溶液无损地将样品转移,直至全部转入离心管,再将样品于恒温培养箱中在25℃以150 r/min恒温振荡16 h,以2 000 r/min离心15 min,测定上清液磷质量分数。

(4) 无机磷分级测定

无机磷中以NaOH-P和HCl-P为主,其中NaOH-P是主要包括的是铁、锰、铝等金属氧化物上吸附包裹的磷,容易释放到水体中。HCl-P是指与碳酸钙磷灰石等Ca²⁺结合的磷,属于稳定的无机磷^[13],其余的无机磷占比较少。笔者以NaOH-P和HCl-P的质量分数的测定为主。

①NaOH-P的测定

称量0.2 g土样放入离心管加入20 mL浓度为1 mol/L的NaOH溶液,在恒温培养箱中以25℃、150 r/min振荡16 h。移出10 mL上清液至试管中,加入4 mL浓度为3.5 mol/L的HCl溶液,剧烈摇晃试管30 s,将其静置16 h,若产生棕色沉淀则以2 000 r/min离心15 min,没有产生棕色沉淀则可以省去这一步骤,直接测量上清液磷质量分数。

②HCl-P的测定

NaOH-P测定后的残渣用12 mL浓度为1 mol/L的NaOH溶液清洗两遍,在恒温培

养箱中振荡 5 min,2 000 r/min 离心 15 min,将上清液弃置。重复一遍试验流程。加 20 mL浓度为 1 mol/L HCl 的溶液,恒温培养箱中以 25 ℃、150 r/min 振荡 16 h。结束后立即以 2 000 r/min 离心 15 min,测定上清液磷的质量分数。

1.3 植物对磷吸收的室内模拟试验

将采集回来的土样去掉杂质后放入到长宽高为 100 cm、80 cm、50 cm 的沙箱中。土样高度为 30 cm。将芦苇在沙箱内均匀布置,沙箱里面种植 12 株芦苇。在实验室培养 30 d。对沙箱里土样的总磷、有机磷、无机磷质量分数每 5 d 测一次。

2 试验结果与分析

2.1 枯水期磷的空间分布特征

2.1.1 枯水期总磷的空间分布特征

图 2 为 4 个采样点的表层和垂直方向上总磷的分布情况。湿地的不同区域总磷的质量分数并不相同,总磷的质量分数在 380.17 ~ 630.95 mg/kg。从入口处到湿地内部再到湿地出口处土壤中的总磷逐渐减少。说明湿地对磷具有一定的净化效果,湿地入口处是 3 条河流的汇流处,而这 3 条河流由于受到高新区工厂排放污水的污染,在汇流处污染物的叠加作用导致总磷的质量分数偏高。同处在湿地的下游断面 A、B 两点中原本是芦苇等挺水植物的生长场所的 B 点的

总磷质量分数高于明水区域 A 点。原因是:一方面由于枯水期温度低,植物根部的微生物的活性低,吸附磷的能力减弱;另一方面由于枯水期植物尚未生长,植物死亡后的残体中磷又会返还到土壤中,导致枯水期中 B 点的总磷大于 A 点。

2.1.2 枯水期总磷的垂向分布特征

图 3 为 4 个采样点中土壤中的总磷随深度变化情况。在湿地的入口处、内部和下游断面中土壤中总磷的质量分数都有随深度的增加而减小的趋势。这是因为不溶态磷酸盐主要累积在土壤表层,可溶态磷酸盐易被土壤胶体所吸附,向下淋失量很小,含磷废水中磷主要被表层土壤所吸附,因此湿地表层土壤中全磷质量分数显著高于下层土壤^[14]。七星湿地土壤总磷的质量分数表、底层差异明显,随着土壤深度的增加总磷的质量分数下降趋势减弱。

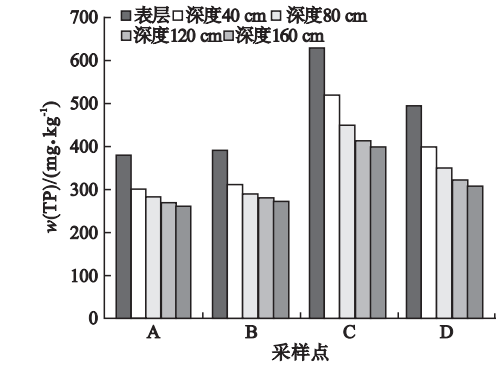


图3 七星湿地枯水期土壤总磷质量分数垂向分布
Fig.3 Vertical distribution of total phosphorus mass concentration in soil of Qixing Wetland during dry season

2.1.3 枯水期无机磷有机磷的空间分布特征

图 4 为七星湿地表层土壤中无机磷和有机磷的质量分数情况。在湿地的各个断面上都有无机磷的质量分数大于有机磷质量分数的情况。无机磷部分可被生物利用,可通过矿化释放到水中^[15]。七星湿地属于人工湿地,土壤中的有机质质量分数低于天然湿地,

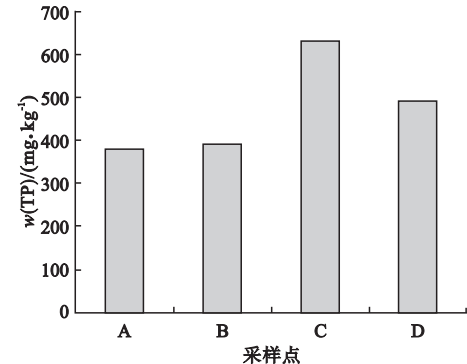


图2 七星湿地枯水期表层土壤总磷质量分数
Fig.2 Mass concentration of total phosphorus in surface soil of Qixing Wetland during dry season

有机磷质量分数较少^[16]。在湿地的入口处无机磷的占比最高,这是由于C点地处三河汇流处,水体所受污染以无机污染为主,土壤中无机磷质量分数高。而B点处有机磷质量分数高是由于植物死亡后被土壤中的微生物分解成有机质。植物死亡后的磷又回归到环境当中,以有机磷的形式存在^[17]。

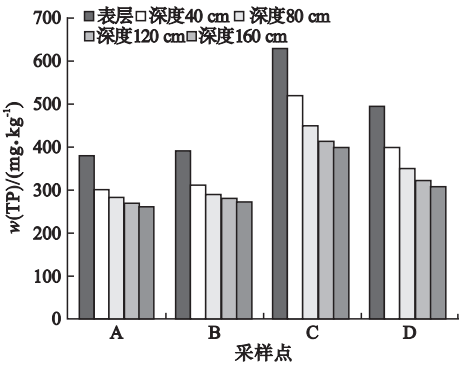


图4 七星湿地枯水期表层土壤中无机磷和有机磷的质量分数

Fig. 4 Mass concentration of inorganic phosphorus and organic phosphorus in surface soil of Qixing Wetland during dry season

2.1.4 枯水期不同形态无机磷空间分布特征

图5为枯水期NaOH-P和HCl-P的质量分数变化。图6为枯水期NaOH-P和HCl-P占无机磷的比例。

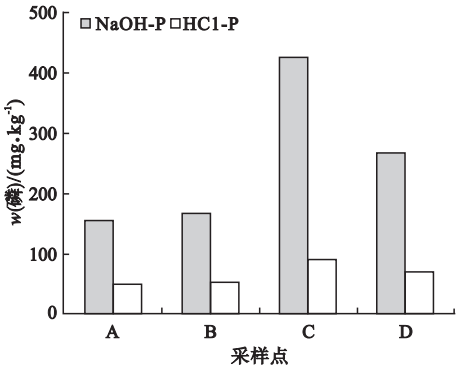


图5 七星湿地枯水期NaOH-P HCl-P质量分数

Fig. 5 NaOH-P HCl-P mass concentration in Qixing Wetland during dry season

从图5发现,在枯水期的湿地中,NaOH-

P占据主要地位。NaOH-P和HCl-P质量分数与总磷有相同的变化趋势。湿地下游断面的B点的HCl-P质量分数大于A点可能是在植物衰败季节腐烂的枯叶等植物组织中的有机磷经过微生物作用会部分转化为HCl-P^[9]。

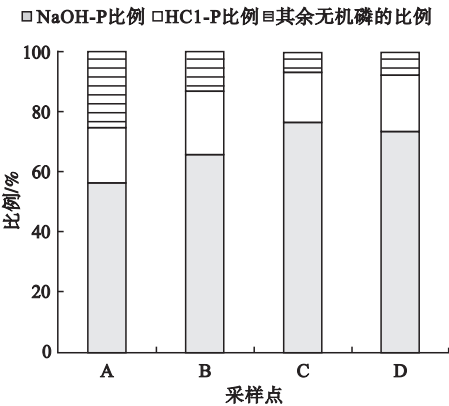


图6 七星湿地枯水期NaOH-P和HCl-P占无机磷的比例

Fig. 6 The ratio of NaOH-P and HCl-P to inorganic phosphorus in Qixing Wetland during dry season

从图6可知,NaOH-P占据无机磷的比例最大,所占比例在56.9%~76.9%。HCl-P的比例在16.70%~17.85%,占无机磷比例的变化程度较NaOH-P小。NaOH-P和HCl-P之和小于无机磷总量,说明存在其他形态的无机磷。

2.2 丰水期磷的空间分布特征

2.2.1 磷的空间分布特征

图7为土壤总磷的时空分布规律。丰水期任意采样点的总磷的质量分数都小于枯水期总磷的质量分数。因为:①由于丰水期地表水位上涨和地下水位抬升部分土壤中的磷会进入到水体当中,减少了土壤中总磷的质量分数。②由于丰水期在7、8月份属于植物生长的旺季,植物生长旺盛,会从土壤中吸收磷来供自身的生长,减少了土壤中的总磷质量分数。③湿地内生长的芦苇等植物还能提高整个湿地生态系统微生物数量^[18],微生物也会同化土壤中的磷,从而降低土壤中总磷质量分数。与枯水期的情况相反,B点处的

总磷质量分数小于了A点,说明种植植物对改善湿地磷的空间分布减少污染具有重要意义。

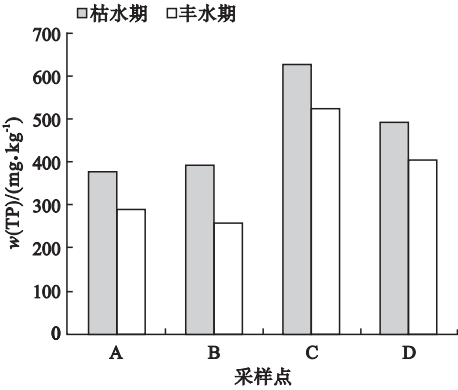


图7 七星湿地土壤总磷的时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of total phosphorus in soil of Qixing Wetland

2.2.2 丰水期总磷的垂向分布特征

图8为4个采样点中土壤中的总磷随深度变化的情况。丰水期土壤总磷的垂向分布规律与枯水期土壤总磷的垂向规律相似,但在D点出现最深层土壤总磷质量分数略高于上一层土壤总磷的质量分数的特殊情况。与枯水期相比,深度40 cm、80 cm处土壤总磷下降的速度变快,这是由于在丰水期植物根部会从土壤中吸收水分和营养物质,微生物活性也较高,导致了土壤中总磷的下降速度加快。

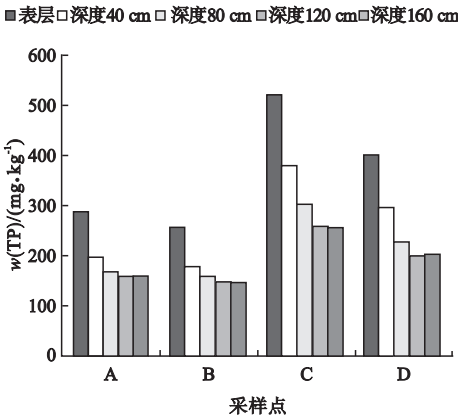


图8 七星湿地丰水期土壤总磷垂向分布图

Fig. 8 Vertical distribution of total phosphorus in soil of Qixing Wetland during wet season

2.2.3 丰水期无机磷有机磷的空间分布情况

图9为丰水期土壤表层无机磷有机磷的分布。与枯水期情况相同,在七星湿地的土壤中无机磷依然占据总磷质量分数的大部分。发现了无机磷占的比例下降,和枯水期相比,有机磷质量分数的下降趋势远没有无机磷下降趋势来的明显,这主要是由于植物对土壤中磷的吸收以无机磷为主,导致无机磷所占的比例下降。

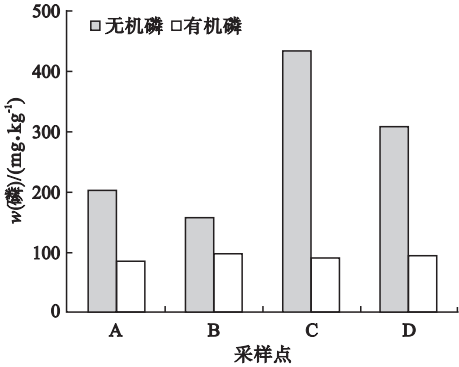


图9 七星湿地丰水期无机磷有机磷质量分数

Fig. 9 Mass concentration of inorganic phosphorus and organic phosphorus in Qixing Wetland during wet season

2.2.4 丰水期不同形态无机磷空间分布情况

图10为丰水期NaOH-P和HCl-P的质量分数变化。图11为丰水期NaOH-P和HCl-P占无机磷的比例。

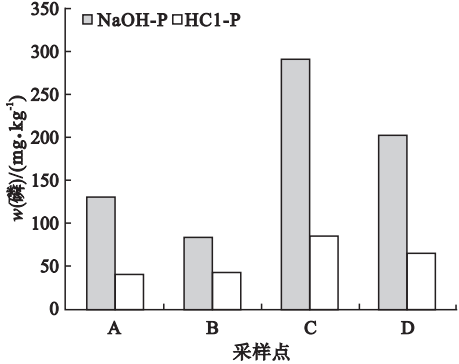


图10 七星湿地丰水期NaOH-P HCl-P质量分数

Fig. 10 The mass concentration diagram of NaOH-P HCl-P in Qixing Wetland during wet season

从图 10 可以看出,将丰水期的 NaOH-P 和 HCl-P 的质量分数与枯水期的 NaOH-P 和 HCl-P 的质量分数进行对照,发现 HCl-P 的质量分数变化不大,这是由于 HCl-P 主要是由于生物作用沉积的颗粒态磷,形态较稳定,导致 HCl-P 的质量分数变化不大。

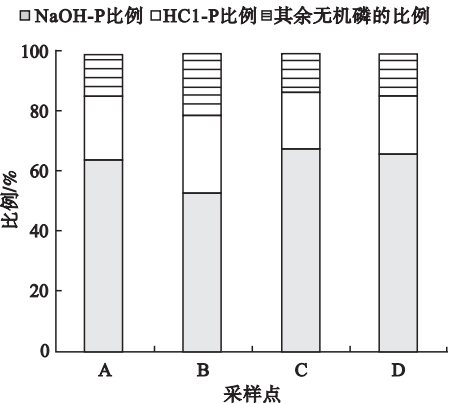


图 11 七星湿地丰水期 NaOH-P 和 HCl-P 占无机磷的比例

Fig. 11 The ratio of NaOH-P and HCl-P to inorganic phosphorus in Qixing Wetland during wet season

从图 11 可以看出,丰水期 NaOH-P 所占的比例下降了,同时在明水区域中NaOH-P所占的比例要大于植物生长区域,这是因为植物通过根系吸收沉积物中部分性质较为活跃的磷,导致更多的 NaOH-P 被分解。

2.3 植物对磷吸收室内模拟试验

图 12 为在植物培养室内模拟试验条件下,土壤中的总磷、无机磷和有机磷随时间变化的趋势。可以看出,植物确实可以在一定

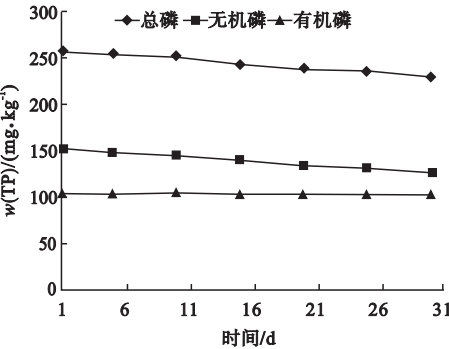


图 12 室内模拟试验下总磷质量分数变化

Fig. 12 Variation of total phosphorus mass concentration in indoor simulation experiment

程度上减少土壤中总磷的质量分数。此外,在种植植物的情况下,无机磷减少的量明显大于有机磷,说明植物以吸收无机磷为主。

3 结 论

(1)七星湿地土壤中总磷在湿地的上游内部和下游呈逐渐减小的趋势。在枯水期植物覆盖区域的总磷质量分数要大于明水区域,而在丰水期情况则正好相反。

(2)七星湿地土壤中总磷在垂直方向上呈现出从表层到深层质量分数逐渐减小的趋势,并且随着深度的增加,总磷减小的趋势减弱。在丰水期总磷减小的速率大于枯水期。

(3)七星湿地土壤中磷以无机磷为主,而在无机磷中又以 NaOH-P 为主。丰水期和枯水期无机磷有机磷比例会发生变化。

(4)通过植物的室内模拟试验,证实了植物可以在一定程度上减少土壤中的总磷质量分数,并且植物以吸收土壤中的无机磷为主,这在一定程度上减少了无机磷的比例。

参考文献

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

[2] BEVERLY S, REBECA R, DANIELI P. Elemental composition of native wetland plants in constructed mesocosm treatment wetlands [J]. Bioresource technology, 2005, 96 (8): 937 - 948.

[3] EHRENFELD J G. Evaluating wetlands within an urban context [J]. Ecological engineering, 2000, 15(3): 253 - 265.

[4] 尹炜,李培军,傅金祥,等. 潜流人工湿地不同基质除磷研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(6): 985 - 988.
(YIN Wei, LI Peijun, FU Jinxiang, et al. Phosphorous removal by different media in subsurface flow constructed wetlands [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006, 22(6): 985 - 988.)

[5] JUDITH M S, JEFFERY C C. Nitrogen, phosphorus and sulfur dynamics in a low salinity marsh system dominated by spartina

- alterniflora [J]. *Wetlands*, 2001, 21(4): 629 – 638.
- [6] FANG T, LIU J T, XIAO B D, et al. Mobilization potential of heavy metals: a comparison between river and lake sediments [J]. *Water, air and soil pollution*, 2005, 161(1): 209 – 225.
- [7] 李文华. 潮滩湿地植物 – 微生物对磷素形态转化影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
(LI Wenhua. Influence of plants-microbes on phosphorus forms in tidal wetland [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.)
- [8] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 247 – 255.
(LIU Jiping, Lü Xianguo, YANG Qing, et al. Soil nutrient distribution of annular wetlands in Sanjiang plain [J]. *Acta pedologica sinica*, 2006, 43(2): 247 – 255.)
- [9] GRUNWALD S, REDDY K R, PRENGER J P, et al. Modeling of the spatial variability of biogeochemical soil properties in a freshwater ecosystem [J]. *Ecological modelling*, 2007, 201(3): 521 – 535.
- [10] 谢莹. 黄河三角洲湿地土壤磷的形态分布及其吸附释放特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
(XIE Ying. Phosphorus fractions and its sorption-release characteristics of the wetland soils in the Yellow River delta [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.)
- [11] 段亮, 宋永会, 白琳, 等. 辽河保护区治理与保护技术研究[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(3): 107 – 112.
(DUAN Liang, SONG Yonghui, BAI Lin, et al. The research of control and conservation technologies of Liaohe River consercation area [J]. *Strategic study of CAE*, 2013, 15(3): 107 – 112.)
- [12] 叶子豪. 石佛寺水库潜流层中铁锰的迁移规律研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(YE Zihao. The Study on the migration of iron and manganese in the submerged layer of Shifosi reservoir [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [13] MURRAY L G, MUDGE S M, NEWTON A, et al. The effect of benthic sediments on dissolved nutrient concentrations and fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 81(2): 159 – 178.
- [14] 赵如金, 李潜, 吴春笃, 等. 北固山湿地土壤氮磷的空间分布特征[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 273 – 277.
(ZHAO Rujin, LI Qian, WU Chundu, et al. Spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the soil of Moun Beigu wetland [J]. *Ecology and environment*, 2008, 17(1): 273 – 277.)
- [15] 谢凯. 淮南潘谢采煤沉陷积水区沉积物磷迁移转化过程与机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
(XIE Kai. Processes and mechnisems of phopshorus transform and transport in the sediments of aquatic zones around the Huainan panxie coal mine subsidence aeras [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.)
- [16] 陈静生, 张宇, 于涛, 等. 对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究: 再论黄河水的COD值不能真实反映其污染状况[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 1 – 5.
(CHEN Jingsheng, ZHANG Yu, YU Tao, et al. A study on dissolution and bio-degradation of organic matter in sediments from the Yellow River [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2004, 24(1): 1 – 5.)
- [17] MEULEMAN A F M, LOGTESTIJN R V, RIJS G B J, et al. Water and mass budgets of vertical flow constructed wetland used for waste water treatment [J]. *Ecological engineering*, 2003, 20(1): 31 – 44.
- [18] GOPAL B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potential and problems [J]. *Water science and technology*, 1999, 40(3): 27 – 35.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)