于子博, 庄 涛, 白军红, 等. 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷含量和储量的季节动态变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 633-640.

YU Zi-bo, ZHUANG Tao, BAI Jun-hong, et al. Seasonal dynamics of soil phosphorus contents and stocks in *Suaeda salsa* wetlands in the intertidal zone of the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 633-640.

黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷 含量和储量的季节动态变化特征

于子博1,庄 涛2,白军红1*,余 璐1,王 伟1,张树岩3

(1.水环境模拟国家重点实验室,北京师范大学环境学院,北京 100875;2济南环境研究院,济南 250102;3.黄河三角洲国家自然 保护区黄河口管理站,山东 东营 257000)

摘 要:以黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地为研究对象,通过在春季、夏季和秋季分别采集0~10 cm 和10~20 cm 土层的土壤样品, 分析了盐地碱蓬湿地土壤磷素的时空动态变化特征。研究结果表明:盐地碱蓬湿地土壤总磷(TP)、有效磷(AP)和 AP/TP 比值的 变化趋势相似,且具有高度的时间异质性,都呈现秋季低、夏季和次年春季高的"V"形分布特征;湿地土壤TP 水平较高,已超过生 态毒性的最低阈值(600 mg·kg⁻¹),但该区土壤 AP/TP 比值低于磷的生物利用度的阈值(2%);湿地土壤 TP 储量随夏季、秋季、次年 春季呈依次减少的变化趋势,AP 储量也呈现秋季低、夏春季高的"V"形分布特征;湿地土壤 TP 、AP 含量和储量在两个土层之间不 存在显著性差异(P>0.05)。湿地土壤 TP 和土壤含水量(P<0.05)、AI 和 Mg(P<0.01)均存在显著正相关关系,和土壤盐度呈显著负 相关关系(P<0.05);AP 和土壤含水量及容重显著正相关(P<0.05);土壤磷素与土壤有机质、土壤 pH 的相关性均未达到显著性水 平(P>0.05)。总体上,黄河三角洲盐地碱蓬湿地土壤磷的垂直变异性不大,但具有明显的季节变异性,其含量与土壤铝镁化合物 以及土壤盐度和含水量具有显著的相关性。

关键词:土壤磷;盐地碱蓬湿地;黄河三角洲;时空变化

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)03-0633-08 doi:10.11654/jaes.2018-1529

Seasonal dynamics of soil phosphorus contents and stocks in *Suaeda salsa* wetlands in the intertidal zone of the Yellow River Delta, China

YU Zi-bo¹, ZHUANG Tao², BAI Jun-hong^{1*}, YU Lu¹, WANG Wei¹, ZHANG Shu-yan³

(1.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Jinan Environmental Research Academy, Jinan 250102, China; 3.Yellow River Estuary Management Station of Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257000, China)

Abstract: Soil samples at both $0\sim10$ cm and $10\sim20$ cm soil layers were collected in summer, autumn, and spring to investigate temporal and spatial dynamics of soil phosphorus in *Suaeda salsa* wetlands in the intertidal zone of the Yellow River Delta. Our results showed that variations in soil total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and AP/TP ratios were similar, showing high temporal heterogeneity, with a V-shaped temporal distribution, where their values were low in autumn and high in summer and spring. Total phosphorus levels in wetland soils were higher than the lowest threshold of ecotoxicity (600 mg·kg⁻¹), but the AP/TP ratios were lower than the threshold of bioavailability of phosphorus (2%). Total phosphorus stocks in wetland soils decreased seasonally following the order summer, autumn, and spring, and the available phosphorus stocks also exhibited a V-shaped distribution. No significant differences in contents and stocks of soil total phosphorus and available phosphorus were observed between 0~10 cm and 10~20 cm soil layers. Soil total phosphorus had significant positive correlations with soil water content (P<0.05), and Al and Mg contents (P<0.01). There was a significant negative correlation be-

*通信作者:白军红 E-mail:junhongbai@163.com

收稿日期:2018-12-06 录用日期:2019-02-03

作者简介:于子博(1996—),男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为湿地水文过程。E-mail:yuzibodl@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505906);北京师范大学学科交叉建设项目

Project supported : The National Key R&D Program in China (2017YFC0505906); The Interdiscipline Research Funds of Beijing Normal University

tween total phosphorus and soil salinity (P<0.05). Available phosphorus was significantly correlated with soil water content and bulk density (P<0.05). However, no significant correlations were observed between soil phosphorus and soil organic matter and soil pH (P>0.05). Generally, there was no large vertical variability of soil phosphorus in the Yellow River Delta, but an obvious seasonal variability was observed, and soil phosphorus contents were clearly related to soil aluminum-magnesium compounds, soil salinity, and water content. **Keywords**: soil phosphorus; *Suaeda salsa* wetlands; Yellow River Delta; temporal and spatial variation

湿地作为地球表层一类重要的生态系统,在保护 河流湖泊水质方面起着至关重要的作用,且承担着多 种营养元素的源、汇和转化器的功能¹¹。磷是湿地植 物生长的主要营养元素之一,土壤磷的分布、迁移和 转化通常会影响湿地生态系统的生产力、结构和功 能,尤其是可以被植物直接吸收利用的有效磷(AP), AP是评估土壤磷供应植物生长能力的重要指标^[2]。 湿地土壤磷的有效性可以反映磷的供应潜力,并指示 周围水生生态系统富营养化的潜在风险,而沿海湿地 的淡水输入可以稀释污染物并降低水体富营养化风 险^[3]。因此,研究湿地生态系统中土壤磷的动态变化 可以保护湿地水质并维持湿地生态系统健康。

目前,国内外学者已经对湿地土壤磷开展了大量的研究。许多研究已经表明土壤磷含量的季节动态 变化与地表植被的生长阶段密切相关^[4-5];同时湿地 土壤磷的变化也受多种土壤理化性质如土壤有机 质^[6]、土壤 pH^[7]、土壤盐度^[8]、土壤含水量^[9]等的影响。 此外,湿地季节性的水文波动能够影响土壤中磷的存 储和释放^[10],落干再淹水处理也会对土壤有机磷的矿 化产生影响^[11]。然而,上述关于湿地土壤磷的研究多 集中于陆地及河、湖、水库等淡水生态系统,对于湿地 磷含量的季节动态变化研究也多集中于湿地的净化 能力^[12],而对于河口湿地中土壤磷库及其生物有效性 的季节动态变化方面的研究尚少。

黄河三角洲由黄河携带的大量沉积物在渤海淤 积而成,是中国乃至世界上最年轻、最典型、最完整、 增长最快的湿地生态系统,具有广阔的洪泛平原和特 殊的河口湿地景观^[13]。盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为一 年生盐生草本植物,是潮滩湿地的关键先锋植物,通 常分布于海陆交互作用强烈的潮间带,对黄河三角洲 湿地的发育和演化具有重要作用。潮间带是海陆间 的缓冲带,在保持海岸带生物多样性方面具有不可替 代的作用^[14]。在潮汐作用的影响下,潮间带湿地的各 类环境因素变化剧烈且频繁,湿地面貌和结构也在不 断变化^[15]。因此,研究潮间带碱蓬湿地土壤磷的动态 变化特征可以为大河三角洲潮间带湿地生态系统的 保护与管理提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲湿地是国际重要湿地之一,也是许多 珍稀濒危鸟类的重要栖息地¹¹⁶。黄河三角洲位于我 国山东省东营市,渤海湾西南岸(37°16′~38°09′N, 118°06′~119°45′E),总面积达6113 km²。该地区以 暖温带大陆季风性气候为主,四季分明。年平均气温 12.1℃,无霜期196 d,年平均降水量576.7 mm,年均 蒸发量1962 mm,夏季降水占全年降水的70%左右。 该地区主要优势植被包括芦苇(Phragmites australis)、 碱蓬(Suaeda heteroptera)、柽柳(Tamarix chinensis)等, 其中盐地碱蓬为潮间带的先锋植物。主要土壤类型 为潮土和盐土。

1.2 样品采集与测定

在黄河南岸的潮间带湿地,选择典型的盐地碱蓬湿地作为采样区(图1),选择4个平行样地,分别于8月(夏季)、11月(秋季)和次年4月(春季)进行土壤样品采集。在每个平行样地,以10 cm间隔采集0~10 cm和10~20 cm土层样品,3个重复,采集后进行同层次样品混合,共计24个混合土壤样品。同时,在每个



样地用环刀采集一个环刀土壤样品用于测定土壤容 重和含水量。所有土壤样品装入自封袋带回实验室 后,放置阴凉处风干2~3周并去除肉眼可见的植物残 体和石块,一部分土样磨碎后过2mm筛用于测定土 壤pH和盐度,另一部分磨碎后过0.149mm筛用于测 定土壤其他化学指标。

土壤pH和盐度分别用pH计和盐度计测定(水土 比为5:1);土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾稀释热 法测定^[17];土壤总磷(TP)和Al、Mg含量使用原子吸收 光谱法(ICP-AAS)测定^[18];土壤有效磷(AP)含量使用 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤容重和土壤 含水量采用烘干法,将环刀采集的土样在105℃烘箱 内烘24h至恒质量来测定。

每个土层中土壤TP储量(TPS)计算方法如式(1): TPS = BD × TP × *h*/100 (1) 式中:TPS 为土壤 TP 储量,g·m⁻²;BD 为土壤容重,g· cm⁻³;TP 为土壤总磷含量,mg·kg⁻¹;*h* 为土层深度,cm。

每个土层中土壤 AP储量(APS)计算方法如式(2): APS = BD × AP × *h*/100 (2)

式中:APS为土壤AP储量,g·m⁻²;BD为土壤容重,g· cm⁻³;AP为土壤有效磷含量,mg·kg⁻¹;h为土层深度, cm。

1.3 统计分析

单因素方差分析(One-way ANOVA)用于确定不同季节与不同土层间 TP 与 AP 的差异性;皮尔森(Pearson)相关性分析和冗余分析(Redundancy Analysis,RDA)方法用于分析土壤TP、AP 和土壤环境变量之间的相关程度。相对于主成分分析,RDA分析在排序图中的排序轴是参与排序的环境变量的线性组合,解释变量对于响应变量的影响被集中在几个合成的排序轴上,因此能够更直观地反映湿地土壤磷含量的环境影响机制。统计分析通过 Microsoft Excel 2013、SPSS 19.0以及 Canoco 4.5 等软件实现。图表制作通过 SigmaPlot 12.5 和 CanocoDraw 4.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 潮间带盐地碱蓬湿地土壤 TP 及 AP 含量的时空 分布特征

黄河三角洲潮间带碱蓬湿地3个季节不同土层 中TP和AP含量如图2所示。研究区内土壤TP含量 范围为531.41~766.35 mg·kg⁻¹, AP含量范围为0.86~ 9.33 mg·kg⁻¹。在空间尺度上,黄河三角洲潮间带碱 蓬湿地土壤的TP在0~10 cm和10~20 cm土层中的含 量差异不显著(P>0.05)。在夏季和秋季,0~10 cm 土 层中TP含量稍低于10~20 cm 土层;而春季土层的TP 含量0~10 cm 稍高于10~20 cm;土壤TP含量最高值 出现在10~20 cm 土层中,最低值出现在0~10 cm 土层 中(图2A)。而土壤AP含量在两个土层中的差异亦 不显著(P>0.05),3个季节中,0~10 cm 土层中的AP 含量均稍低于10~20 cm 土层;与TP含量分布一致, 较高的土壤AP含量出现在10~20 cm 土层中(图2B)。

在时间尺度上,黄河三角洲潮间带碱蓬湿地土壤的TP和AP含量在夏秋春3个季节呈V字形变化,即秋季土壤TP和AP含量低于夏季和春季,且差异显著(TP:P<0.01;AP:P<0.05)。土壤TP含量的最高值出现在夏季(8月),最低值出现在秋季(11月);而土壤AP含量的最高值则出现在春季(次年4月),最低值出现在秋季。这表明土壤TP和AP含量在整个生长季内存在较大波动,在植物生长初期和生长旺盛期含量较高利于植物生长,而在凋落期含量相对较低则利于磷的累积。而土壤TP和AP含量随深度的变异性



不同小写字母表示土壤TP或AP含量季节间存在显著差异(P<0.05) Different lowercase letters represent significant differences in soil TP or AP among seasons(P<0.05)

图 2 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤 TP和 AP 含量的季节变化

Figure 2 Seasonal changes in total phosphorus and available phosphorus in wetland soil in the intertidal zone of the Yellow River Delta

较小,两个土层之间的TP和AP含量不存在显著性差 异(P>0.05,图2)。相较于空间变异性,潮间带盐地碱 蓬湿地的土壤磷含量具有更高的时间变异性。

2.2 潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷活化系数(AP/TP)的 季节变化特征

AP/TP比值也被称为磷活化系数(Phosphorus Activation Coefficient, PAC),是衡量土壤肥力的重要指 标。两个土层中AP/TP比值的季节变化如图3所示。 在夏、秋和春3个季节,黄河三角洲潮间带碱蓬湿地 上下土层的磷活化系数之间没有显著性差异(P> 0.05)。不同土层中,3个时期AP/TP比值均呈现出 10~20 cm 土层略高于0~10 cm。磷活化系数具有显 著的季节变异性(P<0.05)。与土壤磷含量的季节变 化趋势相似,磷活化系数也呈现"V"形的季节变化; 而且与AP含量变化趋势相似,在植物凋落期磷活化 系数最低,其次是在植物生长旺盛期,在植物生长初 期磷活化系数最高。

2.3 潮间带碱蓬湿地土壤磷储量的季节变化特征

图 4A 和图 4B 分别为黄河三角洲潮间带碱蓬湿 地土壤 TPS 和 APS 的季节变化特征。结果表明,土壤 TPS 从夏季到春季逐季降低,在夏季时土壤 TPS 值最 高,达257.80±9.57 g·m⁻²,而在春季时土壤 TPS 达到最 低值(186.24±4.20 g·m⁻²)。土壤 APS 的季节变化和土 壤 AP 相似,呈现秋季低、春夏季高的"V"形变化,其 中 APS 最高值出现在春季,达1.97±0.41 g·m⁻²,而最 低值则出现在秋季(1.05±0.31 g·m⁻²)。3个季节 20 cm 深土层中 APS 占 TPS 的百分比分别为 0.69%、 0.47% 和 1.05%。与土壤 TP 和 AP 含量相似,不同土 层的土壤 TPS 和 APS 差异不显著(P>0.05),表明 0~ 10 cm 和 10~20 cm 土层中的磷储量具有同质性分布







特征。

2.4 潮间带盐地碱蓬湿地土壤环境变量对磷含量的 影响

黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TP和AP的RDA分析结果如图5所示。由图可见,土壤AP和TP含量具有明显的季节差异,而不同土层间的TP和AP含量差异不显著。RDA分析结果表明,4个排序轴特征值分别为0.586、0.027、0.384、0.003,其中前3个轴综合解释了99.7%的累计方差,环境变量对土壤TP和AP的解释量累计达到了100%。环境变量在RDA分析中被限定为排序轴的线性组合,即环境变量与排序轴的相关性大小取决于其与排序轴夹角的余弦值大小,箭头连线的长度代表了该因素的影响大小。如图5所示,与横坐标正方向夹角较小且箭头较长的变量为pH,说明该方向表征土壤的高pH;与纵坐标正方向



不同小写字母表示土壤 TPS或 APS季节间存在显著差异(P<0.05) Different lowercase letters represent significant differences in soil TPS or APS among seasons(P<0.05)

图4 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TPS和APS的 季节变化

Figure 4 Seasonal changes in total phosphorus stocks and available phosphorus stocks in wetland soils in the intertidal zone of the Yellow River Delta

夹角较小且箭头较长的指标有 Salinity,表明此方向 表征了土壤的高盐度;与纵坐标负方向夹角较小且箭 头较长的指标有 Al、Mg,表明该方向表征了高含量的 Al和 Mg;SOM、Moisture与横轴、纵轴的负方向夹角相 近,说明这两个方向均可以表征土壤的高有机物含量 和高含水量。从采样点的分布状况看出,随着植物生 长季节的推进,潮间带碱蓬湿地的土壤环境主要由高 含水量、高土壤有机物和高 Al、Mg含量向高盐度、低 含水量和低 Al、Mg含量方向推进,然后再向高 pH、高 土壤有机物和低容重方向变化。在植物生长旺盛期 土壤的磷含量主要受 Al、Mg含量和含水量因素的影 响,在凋落期主要受盐度和容重影响,在生长初期虽 然受 pH 和有机物影响,但影响程度不及其他几个环 境变量。

在 RDA 排序图中,物种与环境变量之间的相关 性大小主要取决于其对应射线之间夹角余弦值的大 小。如图5所示,Al、Mg和TP正方向夹角极小,说明 Al与Mg和TP正相关且相关性极强,皮尔森相关性分 析结果(表1)也显示这两个环境变量与土壤TP的相 关系数分别达 0.933 和 0.909(P<0.01);此外,土壤含 水量与 TP 正方向、土壤盐度与 TP 负方向的夹角也较 小,表明它们与土壤 TP 也有较强的相关性。相关分析 结果也显示含水量与 TP 显著正相关(P<0.01),盐度与 TP 显著负相关(P<0.05)。pH与 AP 虽然夹角较小,但 pH箭头长度很短,因此它们间并没有显著的相关性。 含水量和容重分别与 AP 的正方向和负方向有较小的 夹角,相关分析也显示它们之间有较为显著的相关性 (P<0.05)。

3 讨论

3.1 潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷含量和储量的时空 动态变化

磷元素是植物生长发育所必需的营养元素之一, 自然土壤中的磷元素主要来源于土壤母质和动植物 残体的分解。虽然植物直接吸收利用的磷形态主要 是 AP,但是土壤中TP含量的变化也在一定程度上反 映了植物对磷吸收利用的情况^[19],因此在本研究中, 潮间带盐地碱蓬湿地的TP和AP的季节变化趋势相



灰色字符表示采集的样品,相同图案代表同一季节,编号中字母表示采样季节(su=summer、fa=fall、sp=spring),编号第一位表示土壤深度(1= 10 cm、2=20 cm),编号第二位表示样点编号。A图中同一椭圆表示样品采集于相同的土壤深度,B图中同一椭圆表示样品采集于同一季节 The gray characters represent the samples, the same pattern represents the same season, the letters indicate the season(su=summer, fa=fall, sp=spring), the first number indicates the soil depth(1=10 cm, 2=20 cm); the second number indicates the sample point number. (A)The same circle indicates that the samples were collected at the same soil depth; (B)The same circle indicates that the samples were collected in the same season

图5 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TP和AP与环境变量RDA分析

Figure 5 RDA bioplots of total phosphorus and available phosphorus and environmental variables in wetland soil in the intertidal zone of the Yellow River Delta

表1 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TP和AP与环境变量的相关分析

Table 1 Correlation analysis of total phosphorus and available phosphorus and environmental variables in wetland soil

in the intertidal zone of the Yellow River Delta							
环境变量 Variables	土壤含水量 Moisture	土壤容重 BD	土壤盐度 Salinity	土壤 pH pH	土壤有机质 SOM	Al	Mg
TP	0.604**	-0.057	-0.513*	-0.068	0.260	0.933**	0.909**
AP	0.436*	-0.446*	-0.297	0.259	0.244	0.024	0.055

注:*表示在0.05水平下显著相关,**表示在0.01水平下显著相关,n=24。

Note:* Significant correlation at P<0.05, ** Significant correlation at P<0.01, n=24.

似,但是AP由于直接受植物吸收利用影响,其相对变 化幅度大于TP。夏季TP含量最高,主要是来源于上 一年的累积[20];此外,夏季降雨导致大气中的磷沉降 也可能提高土壤中的TP含量[21]。而夏季AP含量低 于春季,主要是由于夏季植物生长对AP的吸收导致 其含量较低。在秋季,土壤TP和AP含量均达到了最 低值,主要是因为经过植物生长季,土壤中的磷素被 植物大量吸收,但此时植物凋落物还未被大量分解。 此外,秋季低温对微生物活性和有机磷矿化的抑制也 是导致土壤磷素降低的重要原因[22]。经过冬季,春季 土温升高促进了微生物活动和有机磷矿化,使得春季 土壤 TP和AP回升^[23];此外,有研究表明干燥条件下 湿地土壤中的有机磷更容易矿化转换为土壤AP^[9]。 本研究中春季土壤湿度低于夏秋季节,可能也是春季 土壤 AP含量较高的原因。也有学者指出落于再淹水 处理会促进有机物矿化从而使 AP 含量升高^[11],所以 春季地表冰雪融水可能是春季 AP 含量高于夏秋季的 一个重要原因。

尽管研究区土壤 TP和 AP在 0~10 cm和 10~20 cm 土层中的含量没有显著差异(P>0.05),但是 10~20 cm 土层中的 TP和 AP含量均略高于 0~10 cm (春季 TP除外),这主要是由于盐地碱蓬的根系主要分布在 15 cm的土层内,死根分解归还导致 10~20 cm 土层中的磷含量相对较高^[24]。此外,土壤表层磷素更容易受 潮水侵蚀和淋溶作用而流失^[25],导致表层土壤中的磷 含量低于下层土壤。而春季 TP含量在两个土层中出 现反常可能是由于潮水输入、干湿沉降等因素导致 TP 富集在土壤表层^[26]。

潮间带盐地碱蓬湿地土壤TPS在夏季出现最高值,这是由于7月的调水调沙工程为湿地注入了大量的磷素^[27];秋季次高值主要是因为植物吸收量减少; 而春季由于有机磷矿化和植物吸收等作用导致其土 壤TPS低于秋季和夏季。此外,与夏秋两季相比,春 季较低的土壤容重(表1)也会导致土壤TPS降低^[28]。 土壤 APS 与土壤 AP的季节变化趋势相似,其储量变 化与植物生长息息相关。在秋季,植物经过生长旺盛 期,将土壤中的磷大量吸收利用,而此时的枯落物未 被完全分解,磷被储存在植物体和枯落物中未被释放 出来,因此秋季 APS 最低;到了春季,土壤微生物活性 升高,将上一年累积的枯落物进行分解,其中储存的 磷被释放归还到土壤中,为新一季的植物生长所用, 因此在春季 APS 达到最高值。

3.2 潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷生物有效性及生态 毒性评价

磷活化系数的季节变化趋势与AP一致,其变化 的驱动因素与AP类似。在本研究的3个季节中,所 有土层的磷活化系数均低于磷生物利用度的阈值 (2%)^[6],表明潮间带盐地碱蓬湿地土壤从TP到AP的 转化率较低,植物生长所需要的有效磷供应不足。

湿地土壤的TP含量对于周边水生生态系统存在 一个适宜范围,若超出这个范围则会对植物生长和水 环境造成不良影响。加拿大安大略省环境与能源部 于1993年发布的《安大略省水体沉积物质量保护和 管理指南》中对沉积物中全磷含量的最低和最高生态 毒性级别界定的范围为600~2000 mg·kg^{-1[29]}。本研究 的测定结果显示,除了秋季0~10 cm 土层中的TP含量 较低(590.65±22.61 mg·kg⁻¹),其他季节的各个土层TP 含量均超过了600 mg·kg⁻¹,达到了生态毒性的阈值, 在一定程度上有可能会诱发周边水体的富营养化。 3.3 潮间带盐地碱蓬湿地土壤环境变量对TP和AP 含量的影响

已有许多研究表明土壤磷含量与土壤的多种理 化性质有关,例如土壤有机质^[6]、土壤pH^[7]、土壤盐 度^[8]、土壤含水量^[20]等。在本研究中,土壤TP和Al、Mg 含量有显著的正相关关系,与前人的研究结果一 致^[28,30],这是由于土壤中的活性铝、活性镁在保持土 壤无机磷含量过程中都发挥着重要作用^[31],且不同的 铝化合物对于土壤AP的释放均有抑制作用^[32]。另有

研究表明土壤TP和土壤盐度存在显著的负相关关 系^[3],这一结果在本研究中也得到了证实,其原因在 于在高盐度的土壤中微生物的活动被抑制导致TP含 量的降低^[34]。土壤含水量和土壤磷素间的关系较为 复杂,不同研究得到的二者之间的相关性不尽相 同^[20,28,35]。尽管Olila等^[9]指出干燥的土壤有利于促进 有机磷的矿化,但是在本研究中土壤TP、AP都与土 壤含水量有显著的正相关关系。一方面是由于土壤 含水量在一定程度上影响着土壤微生物活性[36].另一 方面水的渗透性可以反映土壤颗粒的粒径,从而影响 磷在土壤中的吸附和解吸过程。许多研究均已表明 土壤 AP 和土壤 SOM 存在正相关关系[37-38],这是因为 随着土壤有机质矿化量的增加,土壤AP含量升高[35], 但是本研究中土壤磷素和SOM之间的相关性未达到 显著性水平,这可能与研究区土壤的微生物活性有 关。有研究证明土壤pH通过影响土壤磷吸附、解吸 和形态转化过程进而对土壤磷含量产生作用[39]。 Gustafsson 等^[40]发现在碱性条件下 pH 的升高会弱化 土壤中的磷吸收,而且肖蓉等^[26]、Gao等^[28]也都报道了 土壤pH和土壤磷素间存在显著负相关关系,但是在 本研究中土壤pH与土壤磷素之间的相关性未达到显 著性水平。

4 结论

(1)黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TP、AP 含量及磷活化系数在0~10 cm 和10~20 cm 土层中的 垂直变异性不大,但具有明显的季节变异性,随夏季、 秋季、次年春季的时间变化呈现"V"形变化趋势。土 壤TP平均含量高于全国平均水平,但是土壤磷的生 物利用率不高。

(2)黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤TPS的 变化范围为180.62~261.05g·m⁻²,表层和亚表层土壤 对TPS的贡献相当,20 cm 深土壤TP含量在夏季、秋 季、次年春季呈现逐渐减少的变化趋势。

(3)土壤TP的主要影响因素包括Al、Mg、盐度及 含水量,其中Al、Mg与TP具有显著的相关关系,表明 铝化合物和镁化合物在保持土壤磷含量的过程中发 挥着重要作用;土壤AP和含水量、土壤容重的相关关 系显著,但是土壤磷素和土壤有机质、pH的相关性未 达到显著性水平。潮间带湿地土壤对磷的吸附和解 吸机制以及磷形态的转化机制还有待于进一步深入 研究以期能更好地理解滨海湿地土壤磷的时空分布 特征。

参考文献:

- Reddy K R, Delaune R D, Reddy K R, et al. Biogeochemistry of wetlands: Science and applications[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(2):1779.
- [2] Sun J, Xu G, Shao H, et al. Potential retention and release capacity of phosphorus in the newly formed wetland soils from the Yellow River Delta, China[J]. Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica, 2012, 40(10): 1131-1136.
- [3] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):559-568.
- [4] Cross A F, Schlesinger W H. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52 (2):155-172.
- [5] 芦晓峰, 张亦舒, 王 毅, 等. 辽宁双台河口湿地各功能区中沉积物 全磷的时空分布规律[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6):751-756. LU Xiao-feng, ZHANG Yi-shu, WANG Yi, et al. Spatial and temporal distribution of total phosphorus in the sediments of each function area in Shuangtai Estuary wetland[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(6):751-756.
- [6] Xiao R, Bai J, Gao H, et al. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient[J]. *Catena*, 2012, 98:96–103.
- [7] Adhami E, Owliaie H R, Molavi R, et al. Effects of soil properties on phosphorus fractions in subtropical soils of Iran[J]. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 2013, 13(1):11–21.
- [8] Håkanson L, Eklund J M. Relationships between chlorophyll, salinity, phosphorus, and nitrogen in lakes and marine areas[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(3):412-423.
- [9] Olila O G, Reddy K R, Stites D L. Influence of draining on soil phosphorus forms and distribution in a constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 1997, 9(3/4):157-169.
- [10] Gabriel O, Balla D, Kalettka T, et al. Sink or source? The effect of hydrology on phosphorus release in the cultivated riverine wetland Spreewald (Germany)[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2008, 58 (9): 1813-1822.
- [11] Chepkwony C K, Haynes R J, Swift R S, et al. Mineralization of soil organic P induced by drying and rewetting as a source of plant-available P in limed and unlimed samples of an acid soil[J]. *Plant & Soil*, 2001, 234(1):83-90.
- [12] 白秀玲,周云凯,王杰华,等.鄱阳湖湿地灰化苔草生长季氮磷含量与储量的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(13):4752-4760.
 BAI Xiu-ling, ZHOU Yun-kai, WANG Jie-hua, et al. Nitrogen and phosphorus concentration, and storage dynamics of *Carex cinerascens* during the spring growing season in Poyang Lake wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13):4752-4760.
- [13] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, et al. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7):1090–1103.
- [14] 夏玉强,李海龙.影响潮间带湿地的环境水文因素:以海南东寨港 红树林湿地为例[J].长江科学院院报,2010,27(10):35-38.
 XIA Yu-qiang, LI Hai-long. Environmental & hydrogeological fac-

tors of tidal marsh: A case study in Dongzhaigang mangrove reserve [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27 (10):35-38.

[15] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土.黄河口翅碱蓬湿地土壤氮的季节变化
 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1):114-119.
 MU Xiao-jie, SUN Zhi-gao, LIU Xing-tu. Seasonal change character-

istics of soil nitrogen in different Suaeda salsa marsh in the Yellow River estuary[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1):114-119.

- [16] Sun T, Yang Z F, Cui B S. Critical environmental flows to support integrated ecological objectives for the Yellow River Estuary, China[J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(8):973–989.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.

LU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

- [18] Ye X, Bai J, Lu Q, et al. Spatial and seasonal distributions of soil phosphorus in a typical seasonal flooding wetland of the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(11):4811– 4820.
- [19] 白军红,邓 伟, 王庆改,等.内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5):599-603.
 BAI Jun-hong, DENG Wei, WANG Qing-gai, et al. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen and phosphorous in soil profiles from an inland salt marsh[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5):599-603.
- [20] Gao Z, Bai J, Jia J, et al. Spatial and temporal changes of phosphorus in coastal wetland soils as affected by a tidal creek in the Yellow River Estuary, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89/90:114-120.
- [21] Tripathi S K, Kushwaha C P, Singh K P. Tropical forest and savanna ecosystems show differential impact of N and P additions on soil organic matter and aggregate structure[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(11):2572-2581.
- [22] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. *Plant Physiolo*gy, 2011, 156(3):989–996.
- [23] Schmidt I K, Jonasson S, Michelsen A. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11 (2/ 3):147-160.
- [24] 杨永兴, 王世岩, 何太蓉. 三江平原湿地生态系统 P、K 分布特征及 季节动态研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4):522-526. YANG Yong-xing, WANG Shi-yan, HE Tai-rong. Distribution characteristics and seasonal dynamics of phosphorus and potassium in wetland ecosystem in the Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4):522-526.
- [25] Gudimov A, Ramin M, Labencki T, et al. Predicting the response of Hamilton Harbour to the nutrient loading reductions: A modeling analysis of the "ecological unknowns" [J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37(3):494-506.
- [26] 肖 蓉, 白军红, 高海峰, 等. 封闭性和开放性沼泽湿地土壤全磷的季节变化特征[J]. 草业学报, 2010, 19(3):88-93. XIAO Rong, BAI Jun-hong, GAO Hai-feng, et al. Seasonal variations of total phosphorus in marsh soils from open and closed wetlands[J].

Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3):88–93.

- [27] Bai J, Xiao R, Zhang K, et al. Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 450/451(11):244-253.
- [28] Gao Z, Fang H, Bai J, et al. Spatial and seasonal distributions of soil phosphorus in a short-term flooding wetland of the Yellow River Estuary, China[J]. *Ecological Informatics*, 2016, 31:83–90.
- [29] Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario[J]. International & Comparative Law Quarterly, 1993(2):494-495.
- [30] Igwe C A, Zarei M, Stahr K. Fe and Al oxides distribution in some ultisols and inceptisols of southeastern Nigeria in relation to soil total phosphorus[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60 (5) : 1103– 1111.
- [31] Satti P, Mazzarino M J, Roselli L, et al. Factors affecting soil P dynamics in temperate volcanic soils of southern Argentina[J]. Geoderma, 2007, 139(1/2):229-240.
- [32] 梁玉英,黄益宗,孟凡乔.铝化合物控制土壤磷素流失的机理研究
 [J].环境化学,2007,26(2):141-143.
 LIANG Yu-ying, HUANG Yi-zong, MENG Fan-qiao. Effect of aluminum compounds on phosphorus release in soil[J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(2):141-143.
- [33] Liu P, Bai J, Ding Q, et al. Effects of water level and salinity on TN and TP contents in marsh soils of the Yellow River Delta, China[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(10):1118-1124.
- [34] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(6):845-854.
- [35] Ye X, Bai J, Lu Q, et al. Spatial and seasonal distributions of soil phosphorus in a typical seasonal flooding wetland of the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(11):4811– 4820.
- [36] 贾 佳, 白军红, 高照琴, 等. 黄河三角洲潮间带盐沼土壤碳、氮含量和储量[J]. 湿地科学, 2015, 13(6):714-721.
 JIA Jia, BAI Jun-hong, GAO Zhao-qin, et al. Carbon and nitrogen contents and storages in intertidal salt marshes soils in the Yellow River Delta[J]. Wetland Science, 2015, 13(6):714-721.
- [37] Fekri M, Gorgin N, Sadegh L. Phosphorus desorption kinetics in two calcareous soils amended with P fertilizer and organic matter[J]. *Envi*ronmental Earth Sciences, 2011, 64(3):721-729.
- [38] Camargo L A, Júnior J M, Pereira G T, et al. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale[J]. *Catena*, 2013, 100(2): 100-106.

[39] 贾兴永. 土壤性质对外源磷化学有效性及吸附解吸的影响研究
[D]. 北京:中国农业科学院, 2011.
JIA Xing-yong. Study on the effect of soil properties on chemical efficiency and adsorption and desorption of exogenous phosphorus[D].
Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.

[40] Gustafsson J P, Mwamila L B, Kergoat K. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils[J]. *Geoder*ma, 2012, 189/190(6):304-311.