

姚卫举,牟晓杰,万斯昂,等. 不同土地利用方式土壤碳、氮、磷、硫含量及其生态化学计量特征[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):231-239.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.032

# 不同土地利用方式土壤碳、氮、磷、硫含量及其生态化学计量特征

姚卫举<sup>1,2</sup>, 牟晓杰<sup>2</sup>, 万斯昂<sup>2,3</sup>, 徐惠风<sup>1</sup>, 王苗苗<sup>1,2</sup>, 赵泽宇<sup>1,2</sup>

(1. 吉林农业大学农学院, 吉林长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林长春 130102;  
3. 海南师范大学地理与环境科学学院, 海南海口 571158)

**摘要:**为研究不同土地利用方式对土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)、硫(S)含量及其生态化学计量学特征的影响,采集辽河三角洲碱蓬湿地、芦苇湿地、香蒲湿地、油田区芦苇湿地、水稻田、玉米地、榆树林地 7 种不同类型土壤,测定 C、N、P、S 含量及其相关理化性质。结果表明,不同土地利用方式对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量均具有显著影响( $P < 0.05$ ),但对 TS 含量多数未产生显著影响(只有碱蓬湿地和榆树林地存在显著差异)。4 种湿地类型(芦苇湿地、香蒲湿地、碱蓬湿地和水稻田)土壤 SOC 含量显著高于玉米地和榆树林地。芦苇湿地、香蒲湿地、水稻田、玉米地的 TN 含量较高,显著高于其他土壤类型,土壤 TN 含量与 pH 值呈显著负相关关系,而与 Eh 呈显著正相关关系。水稻田 TP 含量最高,芦苇湿地次之,榆树林地最低。不同土地利用方式对土壤 DOC、硝态氮、铵态氮和硫酸盐含量也具有显著影响。芦苇湿地、香蒲湿地、水稻田的 DOC 含量显著高于其他土地利用类型;玉米地硝态氮含量显著高于其他区域,而水稻田铵态氮含量显著高于其他区域( $P < 0.05$ ),这主要与土壤硝化作用与反硝化作用有关;受潮汐作用影响碱蓬湿地硫酸盐含量最高,其他区域无显著差异( $P < 0.05$ )。碱蓬湿地、油田区芦苇湿地和水稻田土壤的 C:N > 20,其他区域均 < 20,表明前 3 种土壤硝化作用受有机碳可利用性控制,其他区域则受铵态氮可利用性控制;除油田区芦苇湿地以外其他区域土壤的 C:P 均小于 200,表明土壤磷活性较高,有利于植物生长;研究区 N:P 均值为 3.5,远低于全国 N:P 平均值(8.0),因此 N 是研究区土壤的限制性营养元素;油田区芦苇湿地 C:S 大于 400,说明该区矿物态硫发生净固定,水稻田土壤 C:S 介于 200~400 之间,表明土壤 S 既不用来合成有机硫也不从有机硫中释放,而其他区域土壤 C:S 均小于 200,表明这些区域目前基本处于土壤有机硫矿化过程中的净释放阶段,S 不是土壤养分限制因素。总体来看,土地利用方式的改变会使土壤 C、N、P、S 含量及其生态化学计量特征发生变化,而这些改变是否有利于生态环境的稳定发展,还有待进一步深入研究。

**关键词:**碳氮磷硫;生态化学计量学;滨海湿地;土地利用

**中图分类号:**S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0231-09

近年来,世界上许多滨海湿地被开垦用于农业生产、工业建设和住宅用地等,全球超过 50% 的滨海盐沼湿地、35% 的红树林、30% 的珊瑚礁已经退化甚至消失<sup>[1]</sup>。土地利用方式的变化显著改变了滨海湿地植物的种类和密度,影响土壤中营养元素的含量<sup>[2]</sup>。探究不同土地利用方式下滨海湿地土壤

营养元素含量的变化,对于深入认识滨海湿地生态系统物质循环响应人类活动及气候变化具有重要的科学意义。

碳(C)、氮(N)、磷(P)、硫(S)是植物生长发育必需的大量元素,是植物体内碳水化合物、蛋白质、磷酸合成代谢过程的物质基础<sup>[3-4]</sup>。生态化学计量学是了解生物、生态系统结构、功能与环境关系的有力工具<sup>[5-7]</sup>。近年来,关于土壤 C、N、P、S 生态化学计量特征的研究较多,有研究表明,土壤 C:N 可以通过改变土壤微生物活性和矿化率来调节土壤理化特性及碳、氮循环<sup>[8-9]</sup>;也有研究表明,C:P 和 C:S 对土壤中 P、S 的固定和矿化具有重要影响<sup>[10-11]</sup>。关于不同土地利用方式对湿地土壤 C、N、P、S 化学计量特征的影响已有过一些相关研究。研

收稿日期:2022-12-03

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项 A 类课题(编号:XDA28110400);国家自然科学基金(编号:41971140);国家“973”计划(编号:2013CB430401)。

作者简介:姚卫举(1999—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事土壤化学研究。E-mail:1048449451@qq.com。

通信作者:徐惠风,博士,教授,主要从事植物生理生态、湿地生态环境与环境生物学的研究。E-mail:xhfzj@163.com。

究显示,湿地土地利用方式改变后,土壤电导率、含水量、全氮含量、碱解氮含量等会发生显著变化<sup>[12]</sup>。天然湿地被开发为榆树林地后,土壤中可溶性有机碳含量、可矿化有机碳含量等显著减少<sup>[13]</sup>。同时,土地利用方式的改变对土壤 C、N、P、S 化学计量特征也会造成不同程度的影响<sup>[14-15]</sup>。

辽河三角洲拥有世界上面积最大的芦苇沼泽湿地,被列入国际湿地保护名录<sup>[16-17]</sup>。近年来,由于大规模发展农业、养殖业和开采石油等使辽河三角洲湿地发生了不同程度的变化<sup>[14]</sup>。当前,关于人类活动对辽河三角洲滨海湿地 C、N、P 的影响已有过一些研究,但关于土地利用方式变化下土壤 C、N、P、S 这 4 种元素及其生态化学计量特征的综合研究仍比较少见<sup>[15,18]</sup>。

鉴于此,本研究选择辽河三角洲 7 种土地利用方式为研究对象,研究不同土地利用方式下土壤 C、N、P、S 含量及其生态化学计量学特征,以期对辽河三角洲湿地的生态恢复与保护管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样区位于辽宁省盘锦市境内的双台河口国家级自然保护区(40°45′~41°10′N, 121°28′~122°58′E),地处辽东湾辽河入海口处,总面积 1 280 km<sup>2</sup>。研究区年平均气温 8.3~8.4℃,年平均降水量 611.6~640.0 mm,大部分发生在夏季<sup>[18]</sup>。主要土地利用方式包括农业活动、水产养殖、石油开采、林业和工业建设等<sup>[19]</sup>。该地区共有 7 万 hm<sup>2</sup> 芦苇沼泽,芦苇年产量 30 万 t,其中大部分用作造纸材料<sup>[20]</sup>。

### 1.2 样品采集与测试

本试验于 2016 年 10 月,在研究区内选取碱蓬湿地(A)、芦苇湿地(B)、香蒲湿地(C)、油田区芦苇湿地(D)、水稻田(E)、玉米地(F)、榆树林地(G)共 7 种土地利用方式作为采样地,每种样地选取 3 个典型采样点用不锈钢土钻采集表层(0~20 cm)土壤样品。将土样带回实验室去除植物根系、动物和碎屑后,于室温下自然风干,然后研磨过 100 目筛后测定相关指标。

其中,土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定;全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定;全硫(TS)含量在用硝酸、盐酸消化后,采用电感耦合等

离子体发射光谱法(硝酸盐法)进行测定;硫酸盐含量的测定采用铬酸钡光度法;可溶解有机碳(DOC)含量用总有机碳分析仪测定;铵态氮和硝态氮含量用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提后用流动分析仪测定;pH 值和氧化还原电位(Eh)用电位法(土水比为 1.0:2.5)测定,电导率(EC)用电导率仪进行测定。

### 1.3 数据处理

利用 Excel 2013 和 Origin 8.0 软件进行数据处理和图形绘制,利用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 ANOVA 和 Duncan's 多重比较,评价不同土地利用方式下土壤中各营养物质含量和生态化学计量比的差异。采用 Pearson 相关性分析和线性回归模型来确定 SOC、TN、TP、TS、DOC、硝态氮、铵态氮的含量,以及生态化学计量比和土壤理化性质之间可能存在的相关关系。采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析。

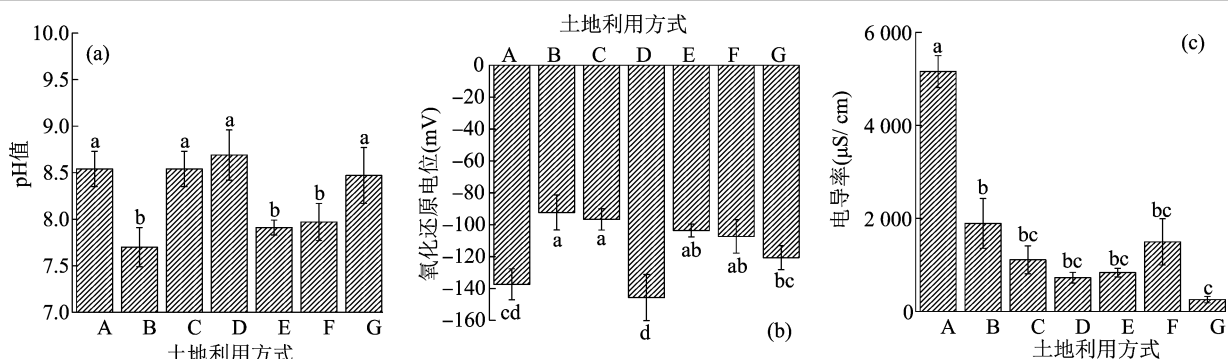
## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式对土壤 pH 值、Eh 和 EC 的影响

由图 1 可知,土地利用方式的变化对土壤 pH 值、Eh 和 EC 均具有显著影响( $P<0.05$ )。其中,碱蓬湿地、香蒲湿地、油田区芦苇湿地和榆树林地土壤的 pH 值较高,芦苇湿地土壤 pH 值与农业用地(水稻田、玉米地)无显著差异。不同土地利用方式中,油田区芦苇湿地土壤 Eh 最低,芦苇湿地最高,芦苇湿地、香蒲湿地土壤 Eh 与农业用地(水稻田、玉米地)无显著差异。不同土地利用方式中,碱蓬湿地土壤 EC 最高,显著高于其他类型土地,榆树林地最低,其他土地利用方式间无显著差异。

### 2.2 不同土地利用方式下土壤 SOC、TN、TP 和 TS 含量

由图 2 可知,不同土地利用方式对土壤 SOC、TN 和 TP 含量均具有显著影响,但对 TS 含量多数无显著影响(碱蓬湿地和榆树林地除外)。土壤 SOC 含量表现为 D>B>E>C>A>G>F,油田区芦苇湿地的 SOC 含量显著高于其他土壤类型,芦苇湿地次之,玉米地、榆树林地的 SOC 含量均显著低于其他 5 种湿地类型的土壤。不同土地利用方式中,芦苇湿地的 TN 含量最高,显著高于碱蓬湿地、油田区芦苇湿地和榆树林地,但与香蒲湿地、水稻田、玉米地无显著差异,土壤 TN 含量表现为 B>E>C>F>G>D>A。不同土地利用方式下,土壤



柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同

图1 不同土地利用方式下土壤的 pH 值、Eh 和 EC

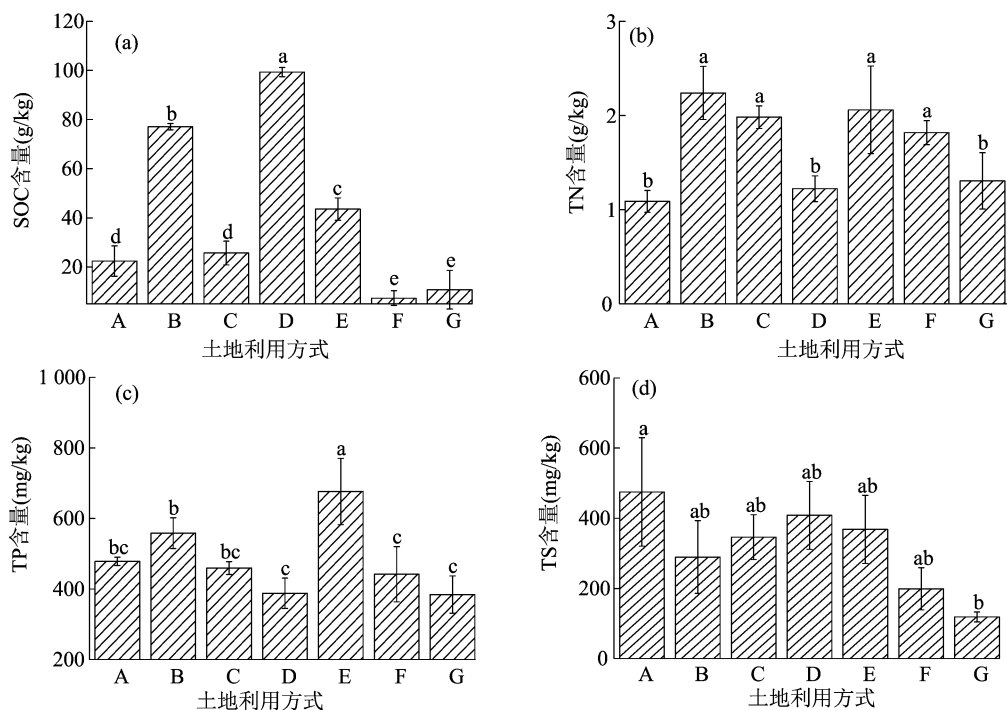


图2 不同土地利用方式下土壤 SOC、TN、TP、TS 的含量

TP 含量表现为  $E > B > A > C > F > D > G$ , 其中, 水稻田 TP 含量最高, 显著高于其他土壤类型, 芦苇湿地次之, 榆树林地含量最低。不同土地利用方式下, 土壤 TS 含量表现为  $A > D > E > C > B > F > G$ , 碱蓬湿地 TS 含量最高, 榆树林地最低。

### 2.3 不同土地利用方式对土壤 DOC、铵态氮、硫酸盐的影响

由图 3 可知, 不同土地利用方式对土壤 DOC、硝态氮、铵态氮、硫酸盐的含量均具有显著影响。芦苇湿地、香蒲湿地、水稻田土壤的 DOC 含量显著高于碱蓬湿地、玉米地、榆树林地, DOC 含量表现为  $E > C > B > D > A > F > G$ ; 铵态氮含量表现为  $E > C > F > D > B > G > A$ , 水稻田土壤铵态氮含量最高, 碱蓬湿地最低, 而玉米地、榆树林地、芦苇湿地、油田区芦苇湿地间则无显著差异; 玉米地土壤的硝态

氮含量显著高于其他土地利用方式, 而其他 6 种土地利用类型土壤硝态氮含量差异较小, 表现为  $F > B > D > E > A > C > G$ ; 碱蓬湿地土壤硫酸盐含量显著高于其他土地利用类型, 而其他 6 种土地利用类型间无显著差异, 表现为  $A > E > B > D > F > C > G$ 。

### 2.4 不同土地利用方式下土壤 C、N、P、S 生态化学计量学特征

由图 4 可知, 不同土地利用方式对 C : N、C : S、C : P、N : P、N : S、P : S 均存在显著影响。油田区芦苇湿地土壤的 C : N、C : S、C : P 最高, 它的 C : N、C : P 显著高于其他 6 种土壤类型, 水稻田土壤次之, 其 C : N、C : P 显著高于其他 5 种土壤类型, 而玉米地与榆树林地土壤的 C : N、C : P 低于其他土壤类型。榆树林地土壤的 N : S、P : S 高于其他土壤类型, 碱蓬湿地土壤的 N : S 低于其他土地

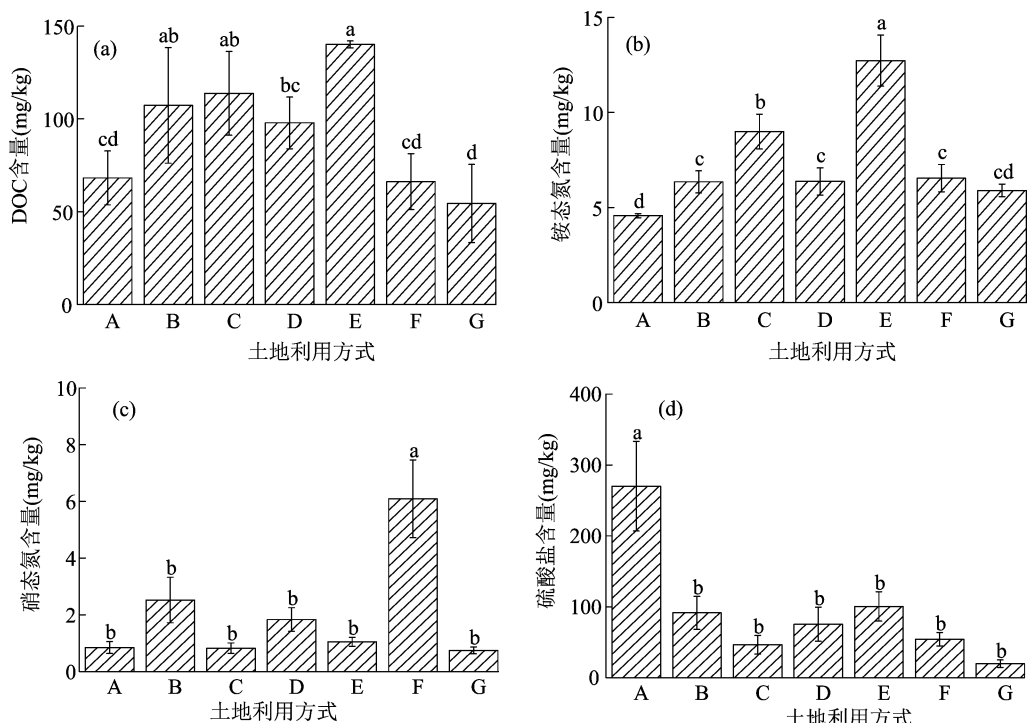


图3 不同土地利用方式下土壤 DOC、铵态氮、硝态氮、硫酸盐的含量

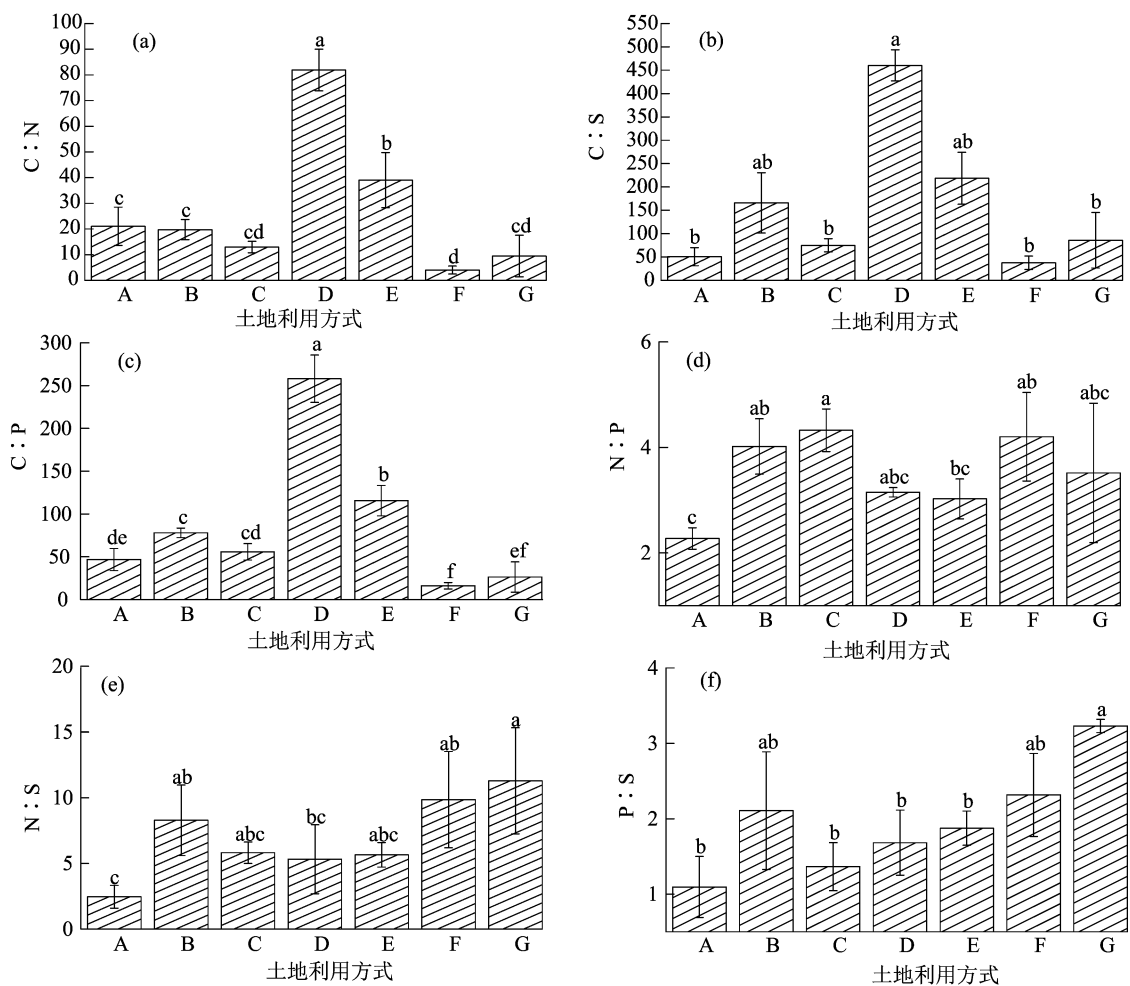


图4 不同土地利用方式下土壤 C、N、P、S 生态化学计量学特征



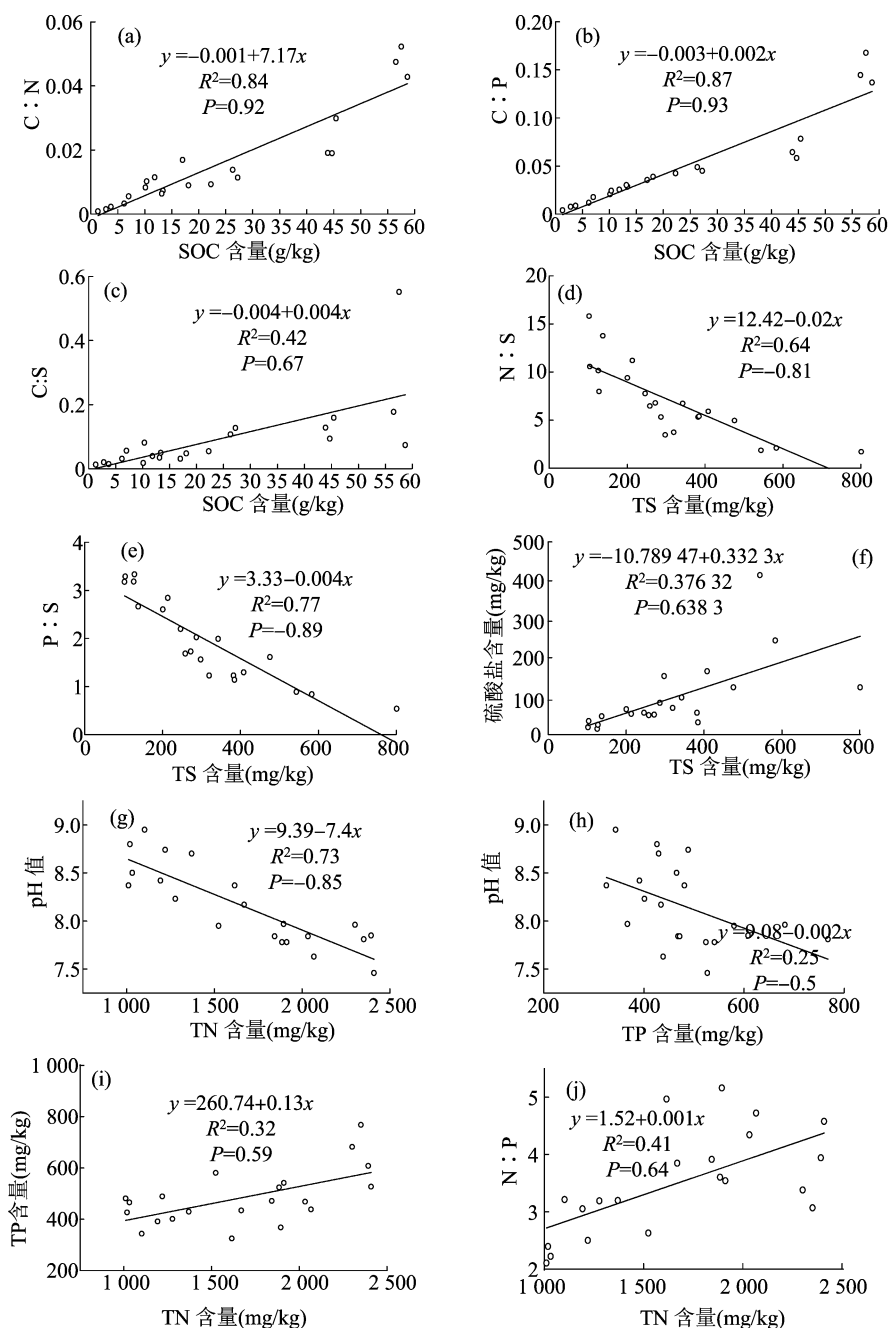


图5 不同土地利用方式下土壤 SOC、TN、TP、TS 的含量及其计量比与土壤因子之间的线性关系

走一部分凋落物,使得植物残体归还量少,从而导致碱蓬湿地表层土壤 TN 含量较低<sup>[22]</sup>。油田区芦苇湿地表层土壤 TN 含量较低,主要由于石油开采及运输等过程中泄露的油类物质会毒害植被,造成该区植被生长发育差,同时石油开采破坏了土壤结构与环境,不利于微生物对氮的固定<sup>[18]</sup>。

研究发现,水稻田 TP 含量显著高于其他区域,芦苇湿地次之,榆树林地 TP 含量最低。土壤 TP 含量与 pH 值呈显著负相关,这与以往的研究结果<sup>[23-24]</sup>类似。pH 值主要通过影响沉积物对磷酸盐

的吸附和离子交换过程而对沉积物中的磷释放产生影响。在中性条件下,磷酸盐主要以  $\text{HPO}_4^{2-}$  和  $\text{HPO}_4^-$  的形式存在,并弱吸附于沉积物表面。随着 pH 值升高,特别是在碱性条件下,  $\text{OH}^-$  与沉积物中的  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等相结合的磷酸盐阴离子产生竞争,并可生成更为稳定的氢氧化物,进而降低沉积物中溶解性活性磷的含量<sup>[25]</sup>。本研究还发现,土壤 TP 含量与 Eh 呈显著正相关,当  $\text{Eh} < 0$  时,可以促进土壤中部分结合态磷大量释放进入水体中,分解后成为溶解性磷酸盐,进而增加磷酸盐含量<sup>[26-27]</sup>。

土地利用方式的改变对辽河三角洲湿地土壤 TS 含量的影响并不显著。但碱蓬湿地土壤 TS 含量最高,分析有 2 种可能的原因:一是碱蓬湿地距海较近,经常受到潮汐作用的影响,海水中大量  $\text{SO}_4^{2-}$  被带入到湿地土壤中,增加土壤硫酸盐含量;二是碱蓬植物为了适应高盐碱环境其自身的蛋白质分子中会形成大量二硫键,用以缓解细胞在盐碱胁迫下的脱水过程,而植物体中所含的 S 元素随着植物的衰老死亡转入到土壤中,从而导致 S 元素在土壤中的积累<sup>[28]</sup>。同时,相关性分析结果表明,TS 含量与 SOC 含量呈显著正相关,主要由于表层土壤中的硫大多以碳键合态硫形式作为土壤有机质的有机组成成分,因此导致 TS 含量与 SOC 含量呈显著正相关<sup>[29]</sup>。以往的研究表明,土壤 TS 含量与 pH 值和 Eh 呈显著相关,但本研究未发现相似规律,可能是因为滨海湿地受海水影响较大,pH 值对硫元素的影响相比于海水潮汐作用和地下径流的影响较小,而造成其对 S 元素的影响被减弱<sup>[30-31]</sup>。

### 3.2 不同土地利用方式对土壤 DOC、硝态氮、铵态氮、硫酸盐含量的影响

土壤中的 DOC 主要来源于植物凋落物、根系、根系分泌物、土壤腐殖质和微生物<sup>[32]</sup>。本研究中,水稻田土壤 DOC 含量显著高于碱蓬湿地、油田区芦苇湿地、玉米地、榆树林地,因为湿地被开垦为农田后,灌排水、耕作等人类活动改变了土壤的理化性质,能够直接影响植物生长和土壤微生物活动<sup>[33]</sup>。同时,与常年水淹和常年干燥的土壤相比,干湿交替能够促进水稻田土壤有机碳的溶解,使得土壤团聚体分散,从而增加了土壤 DOC 含量<sup>[18]</sup>。榆树林地与玉米地的 DOC 含量较低,因为水分条件是影响土壤 DOC 含量的关键因素,榆树林地和玉米地土壤含水量低从而导致 DOC 含量较低<sup>[33]</sup>。同时,DOC 含量与土壤 SOC、TN、TP 和铵态氮的含量均呈显著或极显著正相关关系,这与刘玥等的研究结果<sup>[15]</sup>一致。

此次研究发现,玉米地土壤的硝态氮含量显著高于其他区域,而其他区域间无显著差异,这主要与土壤通气度和氮肥的施用有关。在土壤通气良好的情况下,氨化作用产生的  $\text{NH}_4^+$  会通过硝化作用生成  $\text{NO}_3^-$ ,同时,为保证作物产量,每年会向农田中多次施用氮肥,从而导致玉米地土壤硝态氮的积累<sup>[34]</sup>。而水稻田在常年施用氮肥的情况下,土壤硝态氮含量依然显著低于玉米地,是因为水稻田土壤

长期处于淹水厌氧环境下,反硝化作用活跃,土壤中的  $\text{NO}_3^-$  被还原成  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$ ,进而减少了硝态氮的积累。本研究还发现,碱蓬湿地土壤的铵态氮含量显著低于榆树林地外的其他区域,是因为其本身 TN 含量较低,加之该区域盐碱度高,土壤微生物活性低,微生物氨化作用弱,使得土壤氮元素向铵态氮转变的过程更为缓慢,进而导致铵态氮含量较低。而水稻田土壤由于常年水淹,处于厌氧状态,硝化作用受到抑制,加之水稻田中常年施用氮肥,导致铵态氮含量逐渐积累,使得土壤铵态氮含量显著高于其他区域<sup>[35]</sup>。同时,本研究发现,土壤中铵态氮含量与 TN、TP 含量呈显著或极显著正相关,与 pH 值呈显著负相关。向雪梅等也研究发现,土壤铵态氮含量与 TN、TP 含量呈正相关关系<sup>[36]</sup>。邓天天等研究发现,土壤硝化作用会导致土壤 pH 值降低,同时土壤 pH 值与  $\text{NH}_4^+$  形态转化有着密切关系<sup>[37]</sup>。

不同土地利用方式下,碱蓬湿地的硫酸盐含量显著高于其他区域,而其他土地利用方式间无显著性差异。在滨海地区,土壤中的盐分主要来源于海水,海水中的硫是土壤中硫元素的重要输入源,因此导致碱蓬湿地硫酸盐含量显著高于其他区域<sup>[38]</sup>。同时,硫酸盐含量与 TS 含量、EC 呈极显著正相关,以往研究发现,在滨海湿地中土壤 EC 对土壤硫含量影响显著,这是由于滨海区域海水的输入是一种重要的驱动因子<sup>[38-39]</sup>。

### 3.3 不同土地利用方式对土壤 C、N、P、S 化学计量比的影响

C : N 会影响微生物对有机质的分解状况,与矿化、硝化作用关系密切。研究表明,湿地土壤的硝化作用在 C : N < 20 时主要受铵态氮可利用性的控制,而当 C : N > 20 时主要受有机碳可利用性的控制<sup>[40]</sup>。本研究中,碱蓬湿地、油田区芦苇湿地和水稻田土壤的 C : N > 20,表明这 3 种土壤的硝化作用均受有机碳可利用性的控制,而其他区域土壤 C : N < 20,主要受铵态氮可利用性控制。C : P 能反映土壤中 P 元素的矿化能力和有效性,C : P > 200 表明该地区土壤中 P 有效性低,矿化速率慢,微生物分解受到 P 元素的限制<sup>[41-42]</sup>。油田区芦苇湿地 C : P > 200,表明该区域土壤中 P 有效性较低,其他区域土壤 C : P < 200,土壤养分主要以矿化为主,土壤 P 活性较高,有利于植物的吸收<sup>[43]</sup>。研究表明,土壤 N : P 可以反映养分库容量和氮磷的矿化

速率,研究区 N:P 均值为 3.5,远低于全国 N:P 平均值(8.0),表明 N 是研究区土壤的限制性营养元素<sup>[42,44]</sup>。土壤 C:S 是影响土壤有机硫矿化的关键因子之一,即 C:S 影响着有机硫的转化方向。若  $C:S < 200$ ,土壤有机硫在矿化过程中表现为净释放;若  $C:S > 400$ ,则发生矿物态硫的净固定;当  $200 < C:S < 400$  时,土壤中的 S 既不用来合成有机硫也不从有机硫中释放<sup>[45]</sup>。本研究中,油田区芦苇湿地的  $C:S > 400$ ,说明该区矿物态硫发生净固定,水稻田土壤的  $C:S$  处于 200~400 之间,表明该区土壤中的 S 既不用来合成有机硫也不从有机硫中释放,而其他区域土壤  $C:S$  均  $< 200$ ,表明这些区域目前基本处于土壤有机硫矿化过程中的净释放阶段,S 不是土壤养分限制因素。本研究中土壤  $C:N$ 、 $C:P$ 、 $C:S$  均与有机碳含量呈极显著正相关关系,这与以往的研究相符,表明  $C:N$ 、 $C:P$ 、 $C:S$  主要受土壤有机碳含量的影响<sup>[46]</sup>。另外,土壤  $C:N$  还与 pH 值、Eh 呈显著相关, $C:P$  与土壤 Eh 呈显著负相关。土壤 N:P 与 TN 含量的相关性最为密切(极显著正相关),与 pH 值、Eh 和硫酸盐含量呈显著或极显著相关关系。而 N:S、P:S 与 TS、硫酸盐含量均呈极显著负相关关系,表明土壤 N:S、P:S 主要受硫元素含量的控制。

## 4 结论

不同土地利用方式对辽河三角洲土壤 SOC、TN、TP 含量均具有显著影响。4 种湿地类型(芦苇湿地、香蒲湿地、碱蓬湿地和水稻田)土壤 SOC 含量显著高于玉米地和榆树林地;芦苇湿地、香蒲湿地、水稻田、玉米地 TN 含量显著高于碱蓬湿地、油田区芦苇湿地和榆树林地,而水稻田 TP 含量显著高于其他土壤类型;土壤 TN、TP 含量与土壤 pH 值呈显著或极显著负相关关系,而与 Eh 呈显著正相关关系;碱蓬湿地土壤 TS 含量最高,但总体上土地利用方式变化对土壤 TS 含量并未产生显著影响(榆树林地除外)。

不同土地利用方式对土壤 DOC、铵态氮、硝态氮和硫酸盐的含量也具有显著影响。芦苇湿地、香蒲湿地、水稻田的 DOC 含量明显高于其他土壤类型;硝态氮、铵态氮含量主要与土壤通气条件及农业氮肥施用有关,玉米地硝态氮含量显著高于其他区域,而水稻田铵态氮含量显著高于其他区域;碱蓬湿地硫酸盐含量最高,其他区域硫酸盐含量差异

不显著。

碱蓬湿地、油田区芦苇湿地、水稻田土壤  $C:N > 20$ ,其他区域的  $C:N < 20$ ,表明这 3 种土壤的硝化作用受有机碳可利用性控制,其他区域则是受铵态氮可利用性控制;除油田区芦苇湿地以外,其他区域土壤  $C:P$  均  $< 200$ ,表明土壤磷活性较高,有利于植物的生长;研究区 N:P 平均值为 3.5,远低于全国 N:P 平均值(8.0),因此 N 是研究区土壤的限制性营养元素;除油田区芦苇湿地、水稻田外,其他区域  $C:S$  均  $< 200$ ,表明这些区域土壤处于硫的净释放阶段。

## 参考文献:

- [1] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169–193.
- [2] 陈冲, 贾重建, 卢瑛, 等. 珠江三角洲平原土壤磷剖面分布及形态特征研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1025–1033.
- [3] 刘京涛, 李安琦, 孙景宽, 等. 黄河三角洲贝壳堤湿地优势灌木碳、氮、磷化学计量特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3805–3815.
- [4] Piotrowska – Długosz A, Siwik – Ziomek A, Długosz J, et al. Spatio-temporal variability of soil sulfur content and arylsulfatase activity at a conventionally managed arable field[J]. *Geoderma*, 2017, 295: 107–118.
- [5] Meng L, Qu F Z, Bi X L, et al. Elemental stoichiometry (C, N, P) of soil in the Yellow River Delta nature reserve: understanding N and P status of soil in the coastal estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141737.
- [6] 邓小军, 朱柳霏, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 366–373.
- [7] Qu F Z, Yu J B, Du S Y, et al. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 227–232.
- [8] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87–115.
- [9] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆伊犁河谷土壤碳氮比空间变异及其驱动因素[J]. *中国地理科学*, 2017, 27(4): 529–538.
- [10] Espinosa D, Sale P, Tang C X. Effect of soil phosphorus availability and residue quality on phosphorus transfer from crop residues to the following wheat[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1): 361–375.
- [11] 褚磊, 于君宝, 管博. 土壤有机硫矿化研究进展[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 240–245.
- [12] 丁俊男, 于少鹏, 史传奇, 等. 寒区湿地不同土地利用方式对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3543–3551.
- [13] 简兴, 王松, 翟晓钰, 等. 安徽三汊河国家湿地公园不同土



- 地利用方式下表层土壤活性有机碳含量[J]. 湿地科学, 2019, 17(5): 511–518.
- [14] 罗先香, 张珊珊, 敦 萌. 辽河口湿地碳、氮、磷空间分布及季节动态特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(12): 97–104.
- [15] 刘 玥, 杨继松, 于 洋, 等. 辽河口不同类型湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3011–3020.
- [16] 包德高, 王启龙, 黄红日. 基于最佳特征矢量组合的辽河口湿地分类研究[J]. 水利技术监督, 2021, 29(2): 31–34, 156.
- [17] 刘 丹. 辽河口湿地生态环境综合需水量计算与应用研究[J]. 水利规划与设计, 2021(6): 68–71.
- [18] Wan S A, Mou X J, Liu X T. Effects of reclamation on soil carbon and nitrogen in coastal wetlands of Liaohe River Delta, China[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 443–455.
- [19] 张绪良, 张朝晖, 谷东起, 等. 辽河三角洲滨海湿地的演化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1002–1009.
- [20] 黄桂林, 张建军, 李玉祥. 辽河三角洲湿地分类及现状分析——辽河三角洲湿地资源及其生物多样性的遥感监测系列论文之一[J]. 林业资源管理, 2000(4): 51–56.
- [21] Zhang Z S, Xue Z S, Lu X G, et al. Scaling of soil carbon, nitrogen, phosphorus and C : N : P ratio patterns in peatlands of China[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(4): 507–515.
- [22] 胡敏杰, 任洪昌, 邹芳芳, 等. 闽江河口淡水、半咸水沼泽土壤碳氮磷分布及计量学特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 917–926.
- [23] 白军红, 叶晓飞, 胡星云, 等. 黄河口典型芦苇湿地土壤磷的吸附动力学特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2580–2587.
- [24] 俞琳莺, 孙志高, 陈冰冰, 等. 黄河口新生湿地土壤磷赋存形态及其动态变化对外源氮输入的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5793–5804.
- [25] 郭志勇, 李晓晨, 王 超, 等. pH 值对玄武湖沉积物中磷的释放及形态分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 873–877.
- [26] 黄廷林, 周瑞媛, 夏 超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响[J]. 环境化学, 2014, 33(6): 930–936.
- [27] Li Q M, Zhang W, Wang X X, et al. Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(6): 739–746.
- [28] Idaszkin Y L, Bouza P J, Marinho C H, et al. Trace metal concentrations in *Spartina densiflora* and associated soil from a Patagonian salt marsh[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 89(1/2): 444–450.
- [29] Sun Z G, Mou X J, Song H L, et al. Sulfur biological cycle of the different *Suaeda salsa* marshes in the intertidal zone of the Yellow River Estuary, China[J]. Ecological Engineering, 2013, 53: 153–164.
- [30] Johnston S G, Burton E D, Aaso T, et al. Sulfur, iron and carbon cycling following hydrological restoration of acidic freshwater wetlands[J]. Chemical Geology, 2014, 371: 9–26.
- [31] Kataoka T, Watanabe – Takahashi A, Hayashi N, et al. Vacuolar sulfate transporters are essential determinants controlling internal distribution of sulfate in *Arabidopsis* [J]. The Plant Cell, 2004, 16(10): 2693–2704.
- [32] 张雪雯, 莫 熠, 张博雅, 等. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 134–140.
- [33] Mailapalli D R, Wallender W W, Burger M, et al. Effects of field length and management practices on dissolved organic carbon export in furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 29–37.
- [34] 马 芬, 马红亮, 邱 泓, 等. 水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及  $N_2O$  排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 379–387.
- [35] 朱金霞, 张源沛, 郑国保, 等. 水稻田土壤  $N_2O$  和  $CO_2$  排放日变化规律及最佳观测时间的确定[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 146–150.
- [36] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2769–2777.
- [37] 邓天天, 张玉珠, 马 培, 等. 不同氮磷配比对农田土壤硝化作用的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 269–272.
- [38] 于君宝, 褚 磊, 宁 凯, 等. 黄河三角洲滨海湿地土壤硫含量分布特征[J]. 湿地科学, 2014, 12(5): 559–565.
- [39] 张 艳, 谢文霞, 杜云鸿, 等. 湿地土壤硫分布及其影响机制研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 763–768.
- [40] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口典型潮滩湿地土壤净氮矿化与硝化作用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1466–1473.
- [41] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139–151.
- [42] 刘帅楠, 李 广, 杨传杰, 等. 植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 343–349, 360.
- [43] 陈志杰, 肖宇童, 董雄德, 等. 黄河中下游滩区泥沙淤积对土壤化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1334–1341.
- [44] 张 剑, 宿 力, 王利平, 等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响: 以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 580–589.
- [45] 全小龙, 郑元铭, 段中华, 等. 青海河曲草地土壤全硫及主要养分分布特征[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2234–2242.
- [46] 盘礼东, 李 瑞, 张玉珊, 等. 西南喀斯特区坡耕地秸秆覆盖对土壤生态化学计量特征及产量的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4428–4438.