

王凯选, 刘枝刚, 赵广明, 等. 黄河三角洲不同生境土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(5): 90-99.

WANG Kaixuan, LIU Zhigang, ZHAO Guangming, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus in soils and their ecological stoichiometric ratios in different habitats of Yellow River Delta [J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(5): 90-99.

黄河三角洲不同生境土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征

王凯选^{1,2,3}, 刘枝刚^{4*}, 赵广明^{1,2,3,5,6}, 王伟华⁷, 苏大鹏^{3,5}, 路峰⁷, 康志强⁸, 张尧^{3,5}, 尼鑫^{3,5}, 赵俐红¹

(1 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590; 2 自然资源部生态预警与保护修复重点实验室, 青岛 266033; 3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 4 广西壮族自治区海洋地质调查院, 北海 536000; 5 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266237; 6 自然资源部北方滨海盐沼湿地生态地质野外科学观测研究站, 青岛 266237; 7 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会, 东营 257091; 8 广西壮族自治区地质矿产勘察开发局, 桂林 541000)

摘要:为揭示黄河三角洲湿地不同生境下碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其生态化学计量学特征,以黄河原流经区域——刁口故道区域湿地裸滩、养殖区、芦苇湿地、柽柳湿地、碱蓬湿地及耕地共6种生境为研究对象,测定表层土壤基本理化性质、碳氮磷含量及其生态化学计量特征。结果显示:①土壤C和N的质量分数基本表现为耕地>芦苇湿地>柽柳湿地>养殖区>裸滩,耕地的土壤C和N平均质量分数最高,分别为6.1和1.1 g/kg。而6种生境中土壤P的质量分数差距不大,峰值为1.03 g/kg。②不同生境土壤C、N、P之间回归拟合程度中,相较于N和P以及C和P,C与N的拟合程度较高;③土壤生态化学计量较其他典型湿地明显减少,且N/P显著低于全国平均水平。④土壤环境因子对C、N和P及其计量比存在一定的影响,其中土壤C与密度呈显著负相关,土壤P与含水率呈显著负相关,土壤C/P和N/P均与密度呈负相关。研究表明,刁口故道区域自黄河改道以来,大面积养殖池和耕地等人工湿地的开发对湿地生态化学计量等生态特征产生了一定影响,养分含量有一定程度降低,对了解湿地不同生境的土壤C、N、P及其生态化学计量比差异与调控因素具有重要意义,为湿地生态系统的保护和恢复提供科学依据。

关键词:黄河三角洲湿地; 不同生境; C、N、P; 生态化学计量

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2025.058

0 引言

湿地生态系统作为地球上最重要的生态系统类型之一,是陆地和水生态系统之间的中介,提供

收稿日期: 2025-03-11

资助项目: 广西省重点研发计划(桂科 AB25069497); 山东省自然科学基金(ZR2024MD062); 国家自然科学基金(42076070); 中国地质调查局项目“重要河口及湿地滩区生态地质调查”(DD20221775), “黄渤海海岸带重点生态保护修复区综合地质调查”(DD20211401)

第一作者: 王凯选(2000—), 男, 在读硕士, 主要从事滨海湿地生态地质方面的研究工作. E-mail: 1031315298@qq.com

* 通讯作者: 刘枝刚(1971—), 男, 硕士, 副高级工程师, 主要从事滨海湿地地质方面的研究工作. E-mail: 253731116@qq.com

了许多重要的生态系统服务^[1-2]。湿地存在巨大的环境调节功能和生态效益,在地球化学循环、调节气候、固定碳源等方面扮演着极其重要的角色^[3-6]。近年来,世界上众多滨海湿地被人为开垦,用于人类生产建设,全球超50%的滨海盐沼湿地面临退化危机^[7-8]。土地利用方式的变化对滨海湿地不同植被生境种类和面积有显著影响,同时土壤中营养元素的含量也会发生变化^[9]。探究滨海湿地不同生境下土壤营养元素含量的变化,揭示人类活动及气候变化对滨海湿地生态物质循环的影响,具有重要的研究价值。

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生长发育必需的营养元素,对生态系统初级生产力有显著影

响^[10]。生态化学计量在了解生态系统结构、功能与环境关系方面扮演重要角色^[11-12]。REICH 和 OLEKSYN^[13] 研究发现, N 和 P 元素在不同纬度下是土壤中不同的限制性元素; 还有研究表明, 土壤 C/N 的变化直接影响了土壤微生物活动和有机质分解效率, 进而改变土壤的养分状况和结构^[14]。关于不同生境下对土壤 C、N、P 化学计量特征的影响研究显示, 不同湿地生境下土壤理化性质及营养元素含量均有显著差异^[15-16]。例如在江苏大丰麋鹿国家级自然保护区滨海湿地中, 随着互花米草生境的入侵, 土壤中有机碳含量、 NO_3^- -N 等含量发生显著变化^[17]。同时, 土壤生境的改变对土壤 C、N、P 化学计量特征也会造成不同程度的影响^[18]。

黄河三角洲是中国最大的河口三角洲, 是中国最年轻、最活跃的湿地生态系统。由于农业、养殖业、石油工业的快速发展, 人为活动干扰严重, 使得黄河三角洲湿地发生了很大程度的变化^[19-20]。尤其是原黄河流经的刁口故道区域, 在几十年间大面积开发成养殖塘等人工湿地。目前, 关于人类活动对黄河三角洲滨海湿地 C、N、P 的影响有很多研究^[21-23], 但刁口故道流域不同生境下土壤 C、N、P 及其生态化学计量特征的研究仍比较少。鉴于此, 本研究对黄河三角洲刁口故道流域 6 种生境土壤碳氮磷含量及其生态化学计量比特征进行研究, 以

期为黄河三角洲湿地的生态修复与保护管理提供科学依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲是中国重要的河口三角洲(36°55'—38°16'N、117°31'—119°18'E), 面积约 5 400 km², 其中大部分面积位于中国山东省东营市境内(图 1)。北部和东部紧邻渤海湾, 与辽河三角洲隔海相望。研究区年平均气温为 10.9~11.7 °C, 年平均降水量为 530~630 mm, 多集中在夏季。主要土地利用方式包括农业活动、水产养殖、石油开采、工业建设等。研究区位于黄河三角洲刁口故道区域, 自 1976 年改道以来, 大部分面积受到人工开垦影响变为养殖池, 较自然湿地受人类活动影响较大。

1.2 样品采集与室内分析

样品采集于 2021 年 6 月, 在研究区内选取裸滩、养殖区、芦苇湿地、柽柳湿地、碱蓬湿地、耕地共 6 种生境作为采样地, 各生境取样点个数依次分别为 7、9、8、6、2、6 个, 共 38 个采样点, 每个取样点内采用“品”字型选取典型采样点采集表层

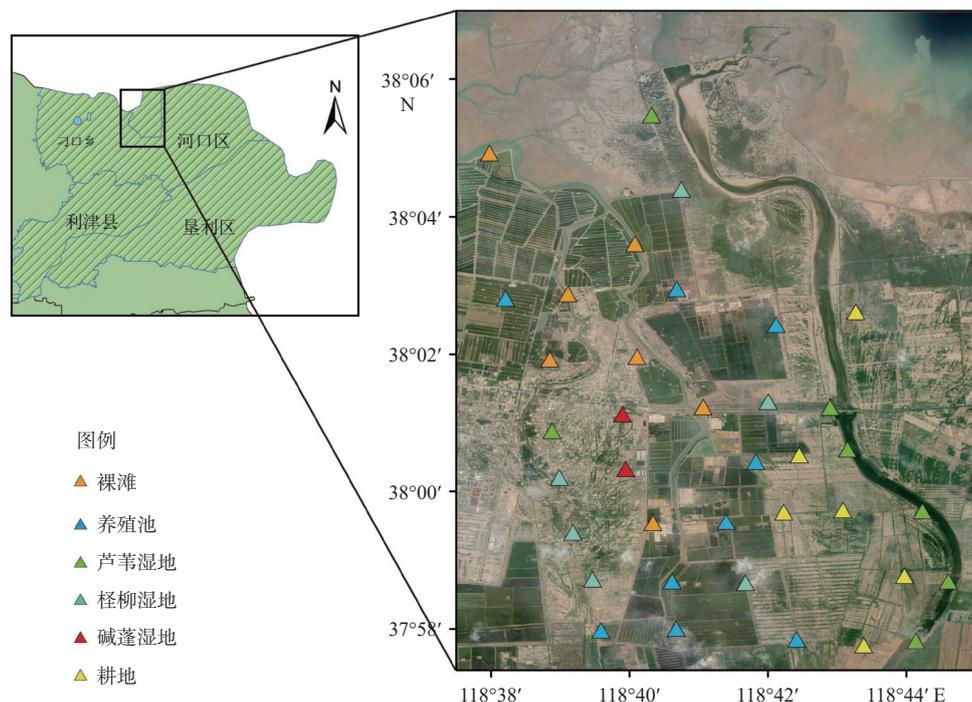


图 1 研究区取样站位位置

Fig.1 Geographical location of sampling sites in the study area

(0~20 cm)土壤样品。取部分样品单独冷藏保存,其余土样在实验室进行植物根系、动物碎屑的清除后,室温下自然风干,之后经研磨过 100 目筛后测定实验指标。

土壤有机碳(SOC)测定前,样品进行充分研磨后过 2 mm 尼龙筛,采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)和全磷(TP)测定样品研磨后经 0.15 mm 尼龙筛后,分别采用凯氏定氮法和酸溶-钼锑抗比色法进行测定;土壤物理性质参数中,电导率(EC)通过水土质量比 5:1,振荡 30 min,静置后使用便携式电导计(COMBI 5000)测定;土壤密度的测定由环刀法完成,土壤含水率由 105 °C 恒温烘干样品后测定^[24]。上述实验均在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。

1.3 土壤 C、N、P 储量计算

土壤表层剖面单位面积一定深度 C、N、P 储量

$$T_C = M \times \rho \times h \quad (1)$$

式中: T_C 为单位面积土壤 C、N、P 储量, kt/km^2 ;

M 为土壤表层 C、N、P 质量分数, g/kg ;

ρ 为土壤表层密度, g/cm^3 ;

h 为土壤厚度, cm 。

1.4 数据处理与分析

本研究原始数据的平均值和标准误差用软件 Microsoft Excel 2019 进行计算;6 种生境土壤 C、N、P 及生态化学计量特征,使用软件 SPSS27.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA);利用软件 Origin 2021 进行含量、线性拟合分析并制图,并分别通过相关性分析(Correlation Plot)模块和主成分分析(Principal Component Analysis)模块进行土壤 C、N、P 质量分数、环境因子和生态化学计量比之间相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤物理特征

表 1 为研究区 6 个生境之间主要物理性质的差异显著。各生境土壤密度平均值由大到小排列为裸滩、养殖区、柽柳湿地、芦苇湿地、碱蓬湿地和耕地,芦苇湿地和柽柳湿地土壤密度大致相同,裸滩和养殖池土壤密度与植被生境有显著差异;裸滩、养殖区、芦苇湿地、柽柳湿地、碱蓬湿地、耕地的电导率平均值依次为 7.72、7.05、1.48、1.68、4.00 和 0.95 mS/cm ,耕地的电导率最低,裸滩的电导率最高;裸滩、养殖区、芦苇湿地、柽柳湿地、碱蓬湿地、耕地的含水量平均值为 24.34%、27.14%、26.56%、19.25%、11.67% 和 12.42%,碱蓬湿地的含水量最低,养殖区的含水量最高。

2.2 土壤 C、N 和 P 质量分数及化学计量比特征

图 2 为黄河三角洲湿地各生境土壤 C、N、P 质量分数及化学计量比的变化情况。在研究区所有采样点中,土壤 C 质量分数峰值在芦苇湿地内,为 8.6 g/kg ;最低值为 0.94 g/kg ,位于养殖区;同时养殖区 C 平均质量分数在 6 种生境中最低,为 2.53 g/kg ;养殖区和裸滩之间无显著差异,与 4 种植被生境差异显著($p < 0.05$),与耕地相比养殖区降低了 2.6 倍。土壤 N 质量分数介于 0.13~1.45 g/kg ,与 C 相同,耕地 N 质量分数也位居 6 种生境的首位,裸滩最低为 0.38 g/kg ,芦苇湿地和耕地显著增加了 1.63 倍和 3.47 倍。土壤 P 质量分数介于 0.65~1.03 g/kg ,几种生境之间含量差异不显著,仍然是耕地含量最高,养殖区 P 质量分数为 0.66 g/kg ,较芦苇湿地降低了 36%。

表 1 不同生境土壤物理特征

Table 1 Soil physical characteristics of different habitats

| 黄河三角洲湿地不同生境 | 土壤密度/ (g/cm^3) | 电导率/ (mS/cm) | 含水量/% |
|-------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 裸滩 | 2.57 ± 0.15^a | 7.72 ± 4.57^a | 24.34 ± 1.28^a |
| 养殖区 | 2.41 ± 0.16^a | 7.05 ± 3.99^a | 27.14 ± 3.16^a |
| 芦苇湿地 | 2.06 ± 0.27^b | 1.48 ± 0.93^b | 26.56 ± 8.07^a |
| 柽柳湿地 | 2.12 ± 0.31^b | 1.68 ± 1.12^b | 19.25 ± 8.99^{ab} |
| 碱蓬湿地 | 1.99 ± 0.06^b | 4.00 ± 3.46^{ab} | 11.67 ± 4.50^b |
| 耕地 | 1.87 ± 0.12^b | 0.95 ± 1.31^b | 12.42 ± 4.78^b |

注:表中数据为平均值±标准误差,同列不同的小写字母表示各生境间土壤物理性质差异显著, ($p < 0.05$),下同。

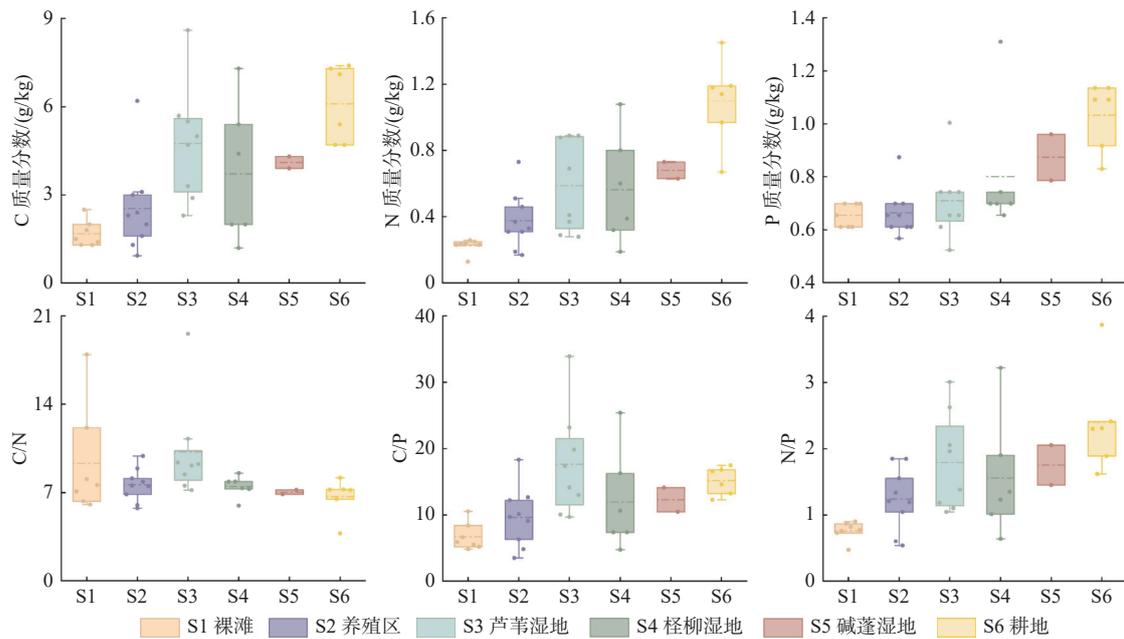


图 2 不同生境土壤的 C、N、P 质量分数及化学计量比

Fig.2 Soil carbon, nitrogen and phosphorus mass fractions and stoichiometric ratios of soils in different habitats

由图 2 可知, 芦苇湿地土壤 C/N 最高, 平均值为 10.23 ± 3.98 , 养殖区、柽柳湿地、碱蓬湿地和耕地 4 种生境 C/N 差距较小, 与裸滩相比养殖区降低了 18%。裸滩的 C/P 平均值为 6.72 ± 2.08 , 相较于裸滩, 芦苇湿地显著增加 1.68 倍, 养殖区增加了 44%; 裸滩湿地的 N/P 明显低于其他生境土壤, 平均值为 0.76 ± 0.14 , 相较于裸滩, 养殖区增加了 63%, 耕地显著增加了 2.16 倍。

2.3 不同生境之间土壤 C、N 和 P 相关性

图 3 对黄河三角洲湿地 6 种生境土壤 C、N、P 3 种元素进行回归拟合分析, 结果显示 C 与 N 的斜率和 R^2 分别为 0.143 2、0.755 9, 呈显著正相关关系 ($p < 0.05$), 说明不同生境中碳氮显示近乎等速的比例关系, 个别生境点存在元素含量过高现象, 如耕地中 N 元素含量较高。C 与 P、N 与 P 的拟合程度

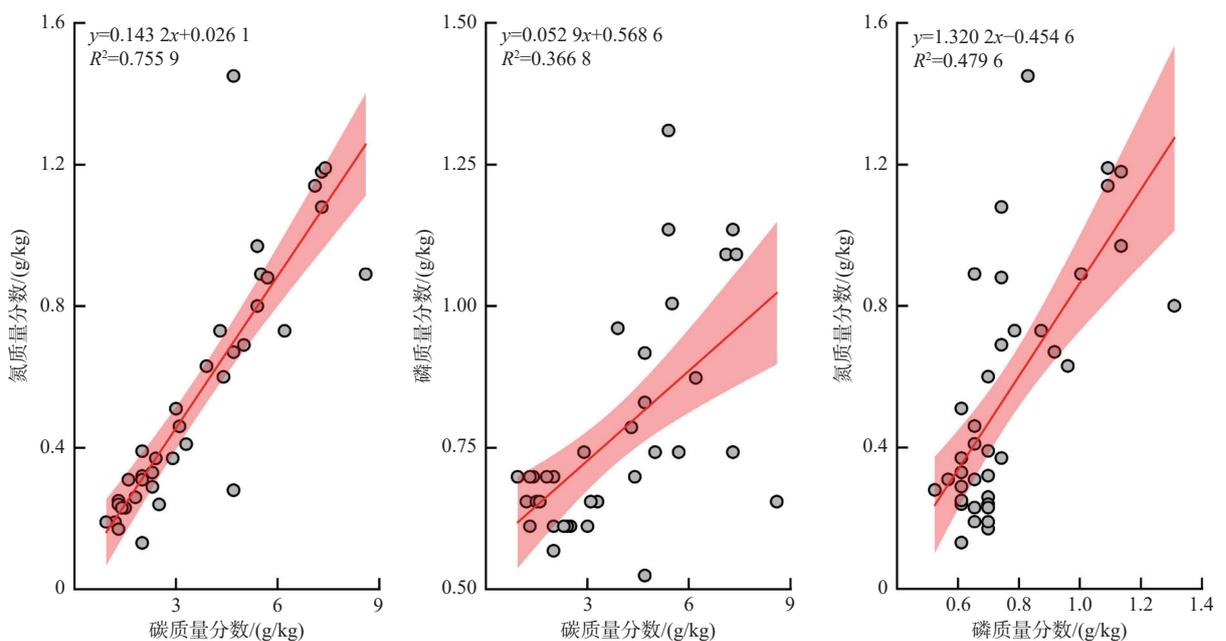


图 3 不同生境土壤间 C、N、P 线性回归分析

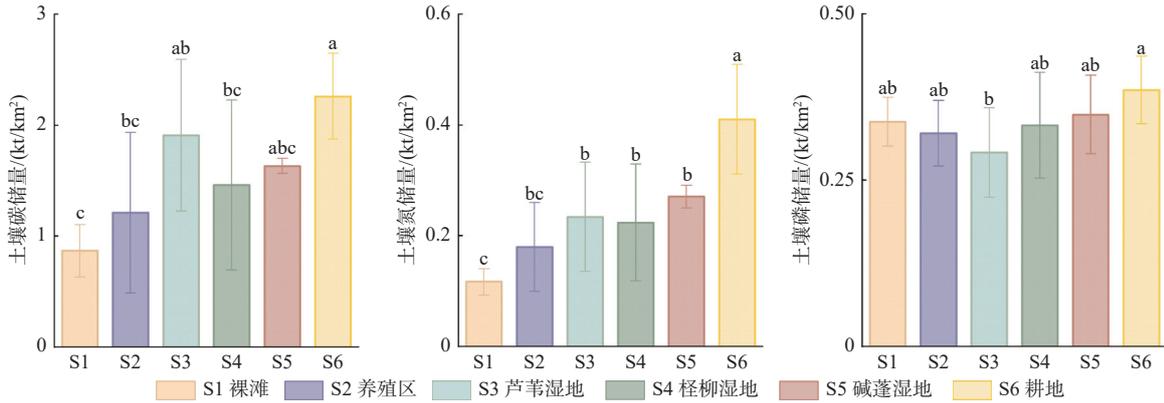
Fig.3 C-N-P linear regression analysis of soils in different habitats

较低,数据分布整体较为离散,说明不同生境中只有C、N含量变化具有一定的同步性。

2.4 土壤 C、N 和 P 储量差异

图 4 展示了黄河三角洲不同生境土壤的 C、N 和 P 储量。裸滩的 C 储量在 6 种生境中最低,与裸滩具有显著差异的是芦苇湿地和耕地生境,土壤 C 储量分别显著提高了 2.20 和 2.61 倍,养殖区增加

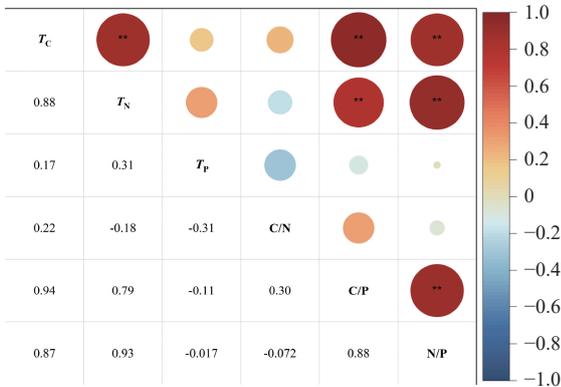
了 40%;养殖区 N 储量与裸滩无显著差异,耕地相较于养殖区 N 储量显著提高 1.29 倍;6 种生境 P 储量均在 0.34 kt/km² 左右,彼此间没有显著差异。如图 5 所示,不同生境土壤 C、N 和 P 储量与生态化学计量比存在一定的相关关系。土壤 C 储量与土壤 C/P($R=0.94, p<0.01$)、土壤 N 储量与土壤 N/P ($R=0.93, p<0.01$)之间均呈极显著正相关;土壤 P 储量与土壤 C/N、C/P、N/P 之间均无明显的相关关系。



不同小写字母表示不同生境土壤之间差异达显著水平, $p<0.05$

图 4 不同生境土壤的 C、N、P 储量

Fig.4 C, N, and P stocks of soils in different habitats



T_C 为碳储量, T_N 为氮储量, T_P 为磷储量

图 5 土壤 C、N、P 储量与生态化学计量比相关关系

Fig.5 Correlation between soil C, N and P stocks and the ecological stoichiometric ratios

2.5 土壤 C、N 和 P 质量分数与生态化学计量比影响因素

为探究环境因子对 C、N、P 质量分数及其生态化学计量比的影响,本研究选取土壤密度(BD)、含水量(HSL)和电导率(EC)3 个指标作为环境因子,对 C、N、P 及 C/N、C/P、N/P 等土壤指标参数进行 PCA 分析。由图 6 可知,第 1 轴和第 2 轴的解释量

分别为 56.9% 和 18.8%,两轴共解释土壤化学计量特征 75.7%。6 种生境中部分生境之间样本点较为集中,如裸滩和养殖区,说明其相似度较高。第一主成分贡献率较大,是不同生境中生态化学计量比影响最显著的因素,土壤密度和 C、N 元素含量在该主成分中绝对值较大,说明土壤密度和碳氮元素的变化在土壤化学计量的变化中驱动影响明显;土

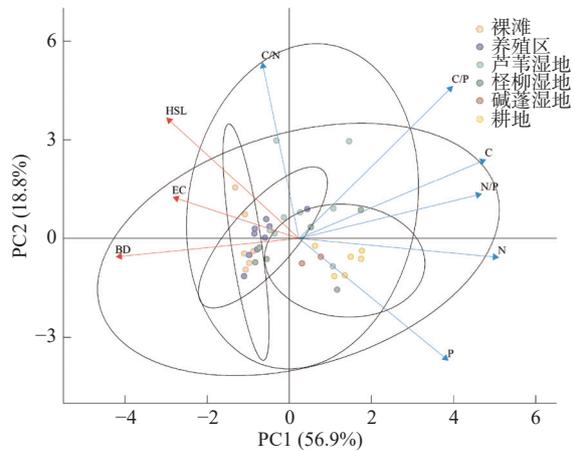
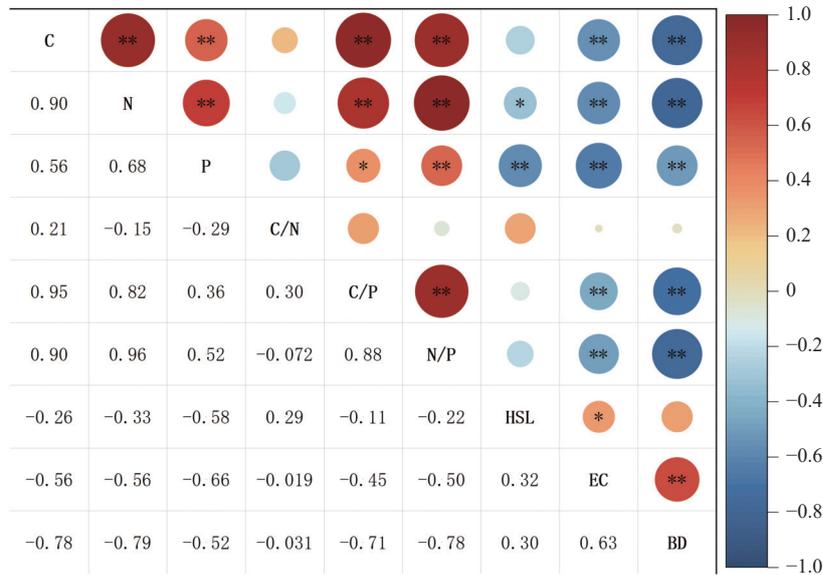


图 6 不同生境环境因子与土壤 C、N、P 含量及其化学计量比之间的 PCA 分析

Fig.6 PCA of environmental factors and C-N-P parameters of soils in different habitats

壤密度对裸滩和养殖区 2 种非植被生境影响较大, C、N 含量对耕地生境生态化学计量比作用显著。土壤 C、N、P 质量分数及其生态化学计量比与土壤理化性质进行了 Spearman 相关性分析, 结果由图 7 可知, 土壤 C 与 N($R=0.90$)、P($R=0.56$)、C/P($R=0.95$)、N/P($R=0.90$)呈极显著正相关($P<0.01$), 呈极显著负相关($p<0.01$)的有土壤电导率($R=-0.56$)、密度($R=-0.78$); 土壤 N 含量与 P($R=0.68$)、C/P($R=0.82$)、N/P($R=0.96$)呈极显著正相关($p<0.01$), 与土壤电导率($R=-0.56$)、密度($R=-0.79$)呈极显著负

相关($p<0.01$), 也与含水率($R=-0.33, p<0.05$)呈显著负相关; 土壤 P 与土壤含水率($R=-0.58$)、电导率($R=-0.66$)、密度($R=-0.52$)均呈极显著负相关($p<0.01$); 土壤 C/P 与 N/P($R=-0.88, p<0.01$)呈极显著正相关, 与土壤电导率($R=-0.45$)、密度($R=-0.71$)呈极显著负相关($p<0.01$); 土壤 N/P 与土壤电导率($R=-0.50$)、密度($R=-0.78$)呈极显著负相关($p<0.01$); 理化性质之间也存在一定的相关关系, 含水率和电导率($R=0.32$)、电导率与密度($R=0.63$)呈显著正相关($p<0.05$)。



*代表 $p<0.05$; **代表 $p<0.01$; BD 为土壤密度、EC 为土壤电导率、HSL 为含水量, 下同

图 7 不同生境土壤 C、N、P 质量分数及其化学计量比与环境因子相关关系

Fig.7 C-N-P mass fractions, stoichiometry, and environmental correlations in soils of different habitats

3 讨论

3.1 不同生境对土壤 C、N 和 P 特征的影响

土壤 C、N、P 元素在植物正常生长发育过程中发挥了重要作用, 作为植物生长必需的营养元素, 土壤 C、N、P 质量分数一定程度上反映了土壤养分补给程度。本研究中 C、N 元素质量分数平均含量范围分别为 0.94~8.6 和 0.13~1.45 g/kg, 除碱蓬湿地类型外, 不同生境 C、N 质量分数大小变化为耕地 > 芦苇湿地 > 柽柳湿地 > 养殖区 > 裸滩。不同生境间 C、N 质量分数因植被不同产生差异, 土壤 C、N 输入输出的过程受植被调控, 进而影响 C、N 元素在土壤中的储存和消耗。有研究表明, 植被凋落物和根系分泌物是土壤有机碳的重要来源^[25], 土

壤中氮元素积累主要取决于生物固氮和动植物残体分解的有机质^[26]。4 种植被生境土壤 C、N 含量均高于养殖池和裸滩, 特别是耕地和芦苇湿地, 生境优势种小麦和芦苇生长密度大, 生长周期中带来大量的凋落物, 经过微生物的分解 C、N 元素可再次回归土壤^[27], 部分耕地在种植期间凋落物会被人为清理, 但由于有机肥等人为碳氮源的输入, 土壤 C、N 含量仍在较高水平。其次, 芦苇湿地和耕地土壤密度小, 土质疏松, 土壤孔隙度较大, 透气状况十分良好, 有利于微生物聚落的生长繁殖, 对凋落物的分解速度大大加快, 促进土壤 C、N 循环; 同时芦苇发达的根系增强了土壤碳氮元素的稳定, 分泌的根系分泌物也是促进微生物生长的有利因素^[28]。研究区总体 C、N 平均含量为 3.68、0.55 g/kg(表 2), 低于全国范围内土壤 C(10 g/kg)、N(0.65 g/kg)平均含量^[29], 除黄河三角洲土壤质地、地下水渗透、

表2 不同地区土壤养分平均含量及生态化学计量比特征
Table 2 Soil nutrient content and ecological stoichiometry in different regions

| 地区 | C/(g/kg) | N/(g/kg) | P/(g/kg) | C/N | C/P | N/P |
|-------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|
| 本研究 | 3.68 | 0.55 | 0.76 | 8.29 | 12.18 | 1.53 |
| 黄河三角洲湿地 ^[11] | 16.60 | 0.64 | 0.67 | 43.9 | 64.5 | 2.0 |
| 闽江河口 ^[32] | 17.02 | 1.02 | 0.74 | 26.0 | 67.7 | 3.2 |
| 平潭海岸带 ^[33] | 44.08 | 4.04 | 0.288 | 10.9 | 153.0 | 14.03 |
| 辽河口 ^[18] | 25.11 | 1.98 | 0.06 | 12.68 | 418.5 | 32.34 |
| 全国 ^[29] | 10 | 0.65 | 0.56 | 11.9 | 61 | 5.2 |
| 全球 ^[34] | / | / | / | 14.3 | 186 | 13.1 |

注：“/”为无数据。

盐分含量等因素不利于有机物质积累和分解外^[22]，主要原因是大面积养殖池的建设，人工湿地迅速取代天然植被湿地，刁口故道流域植被面积减少，降低了土壤对C、N元素的固持作用，分解的凋落物和土壤中现存的C、N元素由于潮汐作用，大部分随水流迁移造成损失^[30-31]，致使土壤C、N含量与全国典型湿地相比较低。

土壤P来源相对固定，黄河三角洲湿地P多源于黄河水流带来的陆源磷，因泥沙沉积存储在淤积土中^[35]。土壤P主要来源于岩石风化和淋溶，其含量受多种因素影响，如气候、生物、成土母质及土壤地球化学过程等。研究区不同生境P含量并无显著区别，空间变异性小，6种生境平均P含量为0.76 g/kg，高于全国平均含量(0.56 g/kg)^[29]，与陈印平等^[36]研究结论相似。黄河三角洲滩地盐碱化土壤高钙离子条件下易降低P元素有效性，加强了土壤中P元素的沉淀与吸附，因此P含量较高^[37]。6种生境中芦苇湿地P储量最低，这是因为芦苇根系发达，生物量丰富，在采样时正值快速生长期，生长过程中大量吸收P元素，降低了土壤中P元素含量。

3.2 不同生境对土壤C、N和P生态化学计量比的影响及其指示意义

土壤C、N、P化学计量比在评估土壤有机质组成、预测有机质分解速率方面具有重要意义。本研究中不同生境下土壤C、N、P化学计量比特征响应不同。土壤C/N既能体现土壤中C、N元素的动态平衡，也能反映有机质的分解进程，土壤C/N处于较高水平时，表明有机质降解作用相对受限，同时土壤有机碳矿化速率较低^[38]。与柽柳和碱蓬湿地相比，耕地和芦苇湿地土壤中C、N元素可能会不断地积累，这是由于农作物与芦苇生长过程中会有凋落物和植物残体的产生，腐烂后变为腐殖质将C、

N元素转移到土壤中。同时，芦苇在生长过程中不断吸收土壤中的氮元素，使其含量持续降低，进而形成较高的C/N值。耕地在人为干预下C、N含量均保持较高水平，C/N值并不突出。研究中芦苇湿地的C/P和N/P在6种生境中都处于前列。芦苇在生长过程中会大量吸收土壤中的磷元素，土壤中P被消耗，同时芦苇湿地中植物枯落物经过分解促进了土壤碳氮元素的积累，此时P元素与土壤中丰富的C元素相比含量较低，拉高了芦苇湿地C/P值。植物受到N限制时通常N/P较低，代表了较高的初级生产力^[39]。除耕地生境外，本研究中C/P、N/P具有相同的趋势，都随芦苇湿地、碱蓬湿地、柽柳湿地、养殖区和裸滩递减，且芦苇湿地均高于其他4种生境。而耕地因其明显的N含量高于其他5类生境，导致N/P同样居于首位，这主要归因于氮肥的广泛施用。针对研究区广泛分布的养殖池生境，与谢杨阳等^[40]的研究不同的是，研究区养殖池C/N与柽柳、碱蓬等自然生境相当，可能是由于大面积养殖池带来的养殖生物残体堆积，使得C可在该区域长期保存。

与其他湿地地区及全国平均值相比，研究区C/N、C/P、N/P值分别为；8.29、12.18、1.53，N/P低于中国土壤N/P平均水平(5.2)^[29]和全球平均水平(13.1)^[34]，说明研究区黄河三角洲滨海湿地土壤存在N限制现象。与黄河三角洲东部保护区湿地相比，研究区刁口故道区域生态化学计量比值均有所减少，这一现象可能与自1976年改道后对天然湿地的不断开垦，该区域养殖池面积大范围扩张有关。

4 结论

(1)对比6种生境的养分特征发现，耕地和芦

苇湿地在碳氮积累、生态化学计量关系中表现突出, 不仅展现了较强的碳氮截留效率, 还体现出两者密切的耦合关系。其次, 芦苇湿地因其较低的 P 含量和较高的 C/P、N/P 值, 反映出研究区芦苇湿地存在 P 限制。土壤密度、含水量是影响 P、C/P 和 N/P 的重要因素。

(2) 与天然植被生境相比, 养殖池在一定程度上降低了土壤养分, 但养殖生物残体的堆积也使得该生境 C/N 等生态化学计量值与其他植被生境类型相差不大。同时, 因养殖池面积的大量扩张, 植被生境减少, 研究区整体养分含量较其他典型湿地明显减少, 且 N/P 显著低于全国平均水平。

参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国湿地行动保护计划 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
National Forestry Administration. China National Wetlands Conservation Action Plan[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000.
- [2] NUTTIGA H, GEORGE C, WU J P. Changes of Wiang Nong Lom and Nong Luang Wetlands in Chiang Saen Valley (Chiang Rai Province, Thailand) during the period 1988-2017[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(11): 4224-4238.
- [3] KUMAR T, MANDAL A, DUTTA D, et al. Discrimination and classification of mangrove forests using EO-1 Hyperion data: a case study of Indian Sundarbans[J]. *Geocarto International*, 2019, 34(4): 415-442.
- [4] FEDDEMA J J, OLESON W K, BONAN B G, et al. The importance of land-cover change in simulating future climates[J]. *Science*, 2005, 310(5754): 1674-1678.
- [5] GALLANT L A. The challenges of remote monitoring of wetlands[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10938-10950.
- [6] 岳保静, 张军强, 辛一. 滨海湿地碳的生物地球化学循环过程 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(2): 72-78.
YUE B J, ZHANG J Q, XIN Y. Carbon biogeochemical cycle in the wetland ecosystem[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(2): 72-78.
- [7] 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.
- [8] 姚长新, 袁红明, 孟祥君, 等. 黄河三角洲滨海湿地损失和退化的自然因素 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 43-50.
YAO C X, YUAN H M, MENG X J, et al. Natural factors for deterioration of coastal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(1): 43-50.
- [9] 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.
CHEN C, JIA C J, LU Y, et al. Studies on P distribution and fractions in soil profile of cultivated land in Pearl River Delta Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1025-1033.
- [10] 刘婕, 勾晓华, 刘建国, 等. 甘南黄河流域 4 种典型林分土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2023, 43(13): 5627-5637.
LIU J, GOU X H, LIU J G, et al. The stoichiometric characteristics of soil C, N and P in four typical forest stands in the Yellow River Basin in Gannan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5627-5637.
- [11] 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.
- [12] 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.
DENG X J, ZHU L F, SONG X C, et al. Soil ecological stoichiometry characteristics of different stand types in Maoershan Nature Reserve[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(2): 366-373.
- [13] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [14] 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.
- [15] 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.
YAO W J, MOU X J, WAN S A, et al. Soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur content and their ecological stoichiometry characteristics under different land use patterns[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(17): 231-239.
- [16] 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.
DING J N, YU S P, SHI C Q, et al. Effects of land use types on soil physicochemical properties and aggregates stability in cold region wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3543-3551.
- [17] 盛昱凤. 滨海湿地互花米草入侵对土壤碳氮磷化学计量时空特征的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
SHENG Y F. Influence of *Spartina alterniflora* invasion on the spatiotemporal characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometry in a coastal wetland[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [18] 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.
LIU Y, YANG J S, YU Y, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of soil in the Liaohu Estu-

- ary wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3011-3020.
- [19] 蔡馨燕, 王毅, 陈英凯. 黄河三角洲湿地生态退化修复的应用研究进展 [J]. 山东科学, 2023, 36(6): 112-120.
CAI X Y, WANG Y, CHEN Y K. Progress of applied research on the ecological degradation and restoration of wetlands in the Yellow River Delta: a review[J]. Shandong Science, 2023, 36(6): 112-120.
- [20] 马乐, 陈健斌, 俞永庆, 等. 近 30 年黄河陆上三角洲蚀退-淤进对气候变化和人类活动的响应 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(9): 49-62.
MA Y, CHEN J B, YU Y Q, et al. Response of Yellow River subaerial delta erosion and accretion to climate change and human activities in the past 30 years[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(9): 49-62.
- [21] 卞福花, 吴秋堂, 吴梦迪, 等. 不同水盐生境下芦苇湿地植被及土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 385-396.
BIAN F H, WU Q T, WU M D, et al. C:N:P stoichiometry in plants and soils of *Phragmites australis* wetland under different water-salt habitats[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 385-396.
- [22] 张友, 徐刚, 高丽, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义 [J]. 地球与环境, 2016, 44(6): 647-653.
ZHANG Y, XU G, GAO L, et al. Distribution characteristics of soil C, N and P in newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China and their stoichiometry implications[J]. Earth and Environment, 2016, 44(6): 647-653.
- [23] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 等. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1731-1738.
QU F Z, MENG L, FU Z Y, et al. The stoichiometry characterization of carbon, nitrogen and phosphorus in different reed-dominated coastal wetland habitats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1731-1738.
- [24] 鲁如坤. 土壤化学农业分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 269.
LU R K. Soil Chemistry Agricultural Analysis Methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 269.
- [25] LEI D, ZHOU P, SHANG G. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 151-165.
- [26] 欧延升, 汪霞, 李佳, 等. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 38-45.
OU Y S, WANG X, LI J, et al. Content and ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in artificial grassland under different restoration years[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(1): 38-45.
- [27] LIU P P, WANG Q G, BAI J H, et al. De-composition and re-
turn of C and N of plant litters of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in typical wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1717-1726.
- [28] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 [J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3064-3069.
GAN S, LU S Y, QIN P F, et al. Spatial distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments from western lakeside belt of Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3064-3069.
- [29] 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: 139-151.
- [30] 白晓霞, 范勇勇, 王厚杰. 黄河刁口废弃流路冲淤演化及其影响因素 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 34-42.
BAI X X, FAN Y Y, WANG H J. Erosion and deposition evolution of the abandoned Diaokou course of the Yellow River and influential factors[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 34-42.
- [31] 王锦, 叶思源, JAYE E C, 等. 滨海湿地水和物质的运移 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 45-50.
WANG J, YE S Y, JAYE E C, et al. Transport of water and sediment in coastal wetlands[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(2): 45-50.
- [32] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4087-4093.
WANG W Q, WANG C, ZENG C S, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [33] 钟春柳, 黄义雄, 张巧, 等. 平潭 4 种主要防护林碳氮磷化学计量特征与碳氮储量研究 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 96-102.
ZHONG C L, HUANG Y X, ZHANG Q, et al. The Stoichiometric characteristics and carbon, nitrogen stores of four main coastal shelterbelt forests in Pingtan[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(2): 96-102.
- [34] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [35] 于君宝, 陈小兵, 毛培利, 等. 新生滨海湿地土壤微量营养元素空间分异特征 [J]. 湿地科学, 2010, 8(3): 213-219.
YU J B, CHEN X B, MAO P L, et al. The spatial differentiation of soil trace nutrient elements in new-born coastal wetland[J]. Wetland Science, 2010, 8(3): 213-219.
- [36] 陈印平, 夏江宝, 赵西梅, 等. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 392-398.
CHEN Y P, XIA J B, ZHAO X M, et al. Effect of different plantation types on soil ecological stoichiometry in Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 392-398.

- [37] 尹君来, 曹翠玉, 史瑞和. 徐淮地区石灰性土壤固磷的研究 [J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 131-138.
YIN J L, CAO C Y, SHI R H. Study on the phosphorus fixation of calcareous soils in Xu-Huai districts[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 131-138.
- [38] 何高迅, 王越, 彭淑娟, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
HE G X, WANG Y, PENG S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [39] ZHANG P, WEI T, LI Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C:N ratio in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 28-35.
- [40] 谢杨阳, 刘旭阳, 金强, 等. 福州东湖湿地不同生境土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2023, 21(4): 79-90.
XIE Y Y, LIU X Y, JIN Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their ecological stoichiometric ratios in different habitats of East Lake Wetland, Fuzhou[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4): 79-90.

Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus in soils and their ecological stoichiometric ratios in different habitats of Yellow River Delta

WANG Kaixuan^{1,2,3}, LIU Zhigang^{4*}, ZHAO Guangming^{1,2,3,5,6}, WANG Weihua⁷, SU Dapeng^{3,5}, LU Feng⁷,
KANG Zhiqiang⁸, ZHANG Yao^{3,5}, NI Xin^{3,5}, ZHAO Lihong¹

(1 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2 Key Laboratory of Ecological Prewarning, Protection and Restoration of Bohai Sea, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266033, China; 3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geologic Survey, Qingdao 266237, China; 4 Guangxi Marine Geological Survey, Beihai 536000, China; 5 The Key Laboratory of Coastal Wetlands Biogeosciences, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geologic Survey, Qingdao 266237, China; 6 Northern Observation and Research Station of Coastal Salt Marshes, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266237, China; 7 Management Committee of Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, China; 8 Guangxi Bureau of Geology & Mineral Prospecting & Exploitation, Guilin 541000, China)

Abstract: To investigate the spatial patterns of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) contents in soils and their ecological stoichiometry in the Yellow River Delta wetlands, we analyzed topsoil physicochemical properties, elemental concentrations, and stoichiometric ratios across six distinct habitats: bare tidal flat, breeding ponds, phragmites australis wetlands, tamarix chinensis wetlands, Suaeda glauca wetlands, and cultivated lands in the former Yellow River-Diaokou wetland area. Key findings include: ① Soil C and N concentrations exhibited significant habitat-specific variations, ranked as follows: cultivated land > phragmites australis wetland > tamarix chinensis wetland > breeding ponds > bare tidal flat. Cultivated land displayed the highest mean C (6.1 g/kg) and N (1.1 g/kg) concentrations. In contrast, soil P concentrations showed minimal variation across habitats, peaking at 1.03 g/kg. ② Regression analyses revealed stronger correlations between soil C and N compared to C-P and N-P relationships across habitats. ③ Ecological stoichiometric ratios (C:N:P) in these wetlands were significantly lower than those in other typical wetland ecosystems, with soil N/P ratios notably below the average value of China. ④ Environmental drivers differentially influenced elemental distributions: soil C correlated negatively with bulk density, while soil P correlated negatively with moisture content. Both C/P and N/P ratios exhibited inverse relationships with bulk density. These findings highlight that anthropogenic activities, particularly large-scale aquaculture in the Diaokou old channel area after the Yellow River diversion, have altered wetland stoichiometric characteristics and reduced nutrient retention capacity. This study provides critical insights into habitat-specific biogeochemical patterns and their regulatory mechanisms, offering a scientific foundation for wetland conservation and ecological restoration.

Key words: Yellow River Delta wetland; different habitats; C, N, P; ecological stoichiometry