



引文格式: 黄金廷, 方拓, 王强, 等. 黄河三角洲典型植被-土壤主要营养成分特征分析[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 41-50. DOI: 10.12401/j.nwg.2024119

Citation: HUANG Jinting, FANG Tuo, WANG Qiang, et al. Analysis Main Nutrient Components of Typical Vegetation and Soil in the Yellow River Delta[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 41-50. DOI: 10.12401/j.nwg.2024119

黄河三角洲典型植被-土壤主要营养成分特征分析

黄金廷^{1,2}, 方拓¹, 王强³, 王嘉玮¹, 宋歌¹, 张太平³

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250000)

摘要: 黄河三角洲湿地是暖温带保存最典型的湿地生态系统。受人类活动、黄河频繁改道与入海水沙快速变化的影响, 湿地的植被覆盖度与群落结构等均随之快速变化, 进而影响土壤的营养成分。为查明黄河三角洲典型植被土壤的碳氮磷生态化学计量比, 笔者以山东省东营市黄河三角洲为研究区, 采集典型天然植被、裸土和农作物的土壤样品(0~30 cm)并测定有机碳、总氮、总磷营养成分含量。结果表明: ①不同植被类型的土壤中总有机碳含量: 大豆(*Glycine max*) > 玉米(*Zea mays*) > 棉花(*Gossypium spp.*) > 裸土 > 高粱(*Sorghum bicolor*) > 翅碱蓬(*Suaeda salsa*) > 互花米草(*Spartina alterniflora*) > 芦苇(*Phragmites australis*) > 怪柳(*Tamarix chinensis*); 总氮含量: 大豆 > 棉花 > 高粱 > 互花米草 > 翅碱蓬 > 裸土 > 玉米 > 怪柳 > 芦苇。②在 0~10 cm 土层中, 营养元素在土壤中的质量分数 $\omega(C)/\omega(N)$: 裸土 > 芦苇 > 翅碱蓬 > 互花米草 > 怪柳 > 棉花 > 高粱 > 大豆 > 玉米; $\omega(N)/\omega(P)$: 大豆 > 玉米 > 棉花 > 互花米草 > 高粱 > 翅碱蓬 > 怪柳 > 裸土 > 芦苇; $\omega(C)/\omega(P)$: 大豆 > 棉花 > 玉米 > 裸土 > 互花米草 > 翅碱蓬 > 高粱 > 芦苇 > 怪柳。③农业利用对土壤的总氮和总磷都有富集作用, 大豆土壤的各种营养成分都高于其他几种农作物土壤; 天然植被有机碳的含量都比裸土的低, 互花米草和裸土的总氮含量在 20~30 cm 土层中比其他天然植被的高出一倍; 不同植被类型对土壤氮的积累的影响差异较大, 而互花米草对不同土层土壤的氮积累都表现出抑制效果。总之, 天然植被和农作物对土壤营养成分的影响比较复杂, 天然植被对土壤的营养成分的消耗大于富集, 而农作物及农业利用对土壤营养成分的富集大于消耗。

关键词: 土壤营养成分; 天然植被; 农作物; 生态化学计量; 黄河三角洲

中图分类号: P343.5; S158

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0041-10

Analysis Main Nutrient Components of Typical Vegetation and Soil in the Yellow River Delta

HUANG Jinting^{1,2}, FANG Tuo¹, WANG Qiang³, WANG Jiawei¹, SONG Ge¹, ZHANG Taiping³

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250000, Shandong, China)

收稿日期: 2024-01-06; 修回日期: 2024-11-19; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室开放课题基金(SKF2024-02), 国家自然科学基金项目“旱区土壤-地下水蒸发与积盐互馈机制研究”(42177076), “鄂尔多斯盆地风沙滩区土壤-地下水蒸散发机理研究”(41672250), 陕西省重点研发项目“气候变化对黄河流域(陕西段)生态系统影响与风险应对研究”(2021ZDLSF05-09)联合资助。

作者简介: 黄金廷(1979-), 男, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事水资源可持续开发利用与生态效应的研究工作。E-mail: hjinting@xust.edu.cn。

Abstract: The Yellow River Delta wetland represents one of the most typical ecosystems in the temperate zone. Influenced by human activities, frequent channel shifts of the Yellow River, and rapid changes in sediment discharge to the sea, the vegetation cover and community structure of the wetland have undergone rapid changes, subsequently affecting soil nutrient components. In order to elucidate the ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in typical vegetation soils of the Yellow River Delta, this study focused on the Dongying City region in Shandong Province. Soil samples (0 to 30 cm) were collected from typical natural vegetation, bare soil, and crops, and the concentrations of organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus were determined. The results indicated that: ① Total organic carbon content in soils of different vegetation types followed the order: *Glycine max* > *Zea mays* > *Gossypium spp.* > bare soil > *Sorghum bicolor* > *Suaeda salsa* > *Spartina alterniflora* > *Phragmites australis* > *Tamarix chinensis*; Total nitrogen content showed the order: *Glycine max* > *Gossypium spp.* > *Sorghum bicolor* > *Spartina alterniflora* > *Suaeda salsa* > bare soil > *Zea mays* > *Tamarix chinensis* > *Phragmites australis*. ② In the 0 to 10 cm soil layer, the soil $\omega(C)/\omega(N)$ ratios were in the order: bare soil > *Phragmites australis* > *Suaeda salsa* > *Spartina alterniflora* > *Tamarix chinensis* > *Gossypium spp.* > *Sorghum bicolor* > *Glycine max* > *Zea mays*; $\omega(N)/\omega(P)$ ratios followed the order: *Glycine max* > *Zea mays* > *Gossypium spp.* > *Spartina alterniflora* > *Sorghum bicolor* > *Suaeda salsa* > *Tamarix chinensis* > bare soil > *Phragmites australis*; $\omega(C)/\omega(P)$ ratios were in the order: *Glycine max* > *Gossypium spp.* > *Zea mays* > bare soil > *Spartina alterniflora* > *Suaeda salsa* > *Sorghum bicolor* > *Phragmites australis* > *Tamarix chinensis*. ③ Agricultural utilization had an enriching effect on total nitrogen and total phosphorus in the soil. The nutrient content in *Glycine max* soil was higher than that in the soils of other crops. The organic carbon content in natural vegetation was lower than that in bare soil. *Spartina alterniflora* and bare soil had double the total nitrogen content in the 20 to 30 cm soil layer compared to other natural vegetation. Different vegetation types had a significant impact on soil nitrogen accumulation, and *Spartina alterniflora* exhibited an inhibitory effect on nitrogen accumulation in different soil layers. In conclusion, the influence of natural vegetation and crops on soil nutrient components is complex, with natural vegetation consuming more nutrients than accumulating, while crops and agricultural utilization contribute more to nutrient enrichment than depletion.

Keywords: soil nutrients; natural vegetation; crops; ecological stoichiometry; Yellow River Delta

土壤为植物生长提供营养成分, 土壤营养成分在生物地球化学循环过程中是重要的物质基础(孙德斌等, 2022; 黄勇等, 2023)。其中 C、N、P 和 K 元素对植被生长发育起关键作用。P 会影响到 DNA 的复制和 RNA 的转录, 从而限制到植物的生长发育。K 元素参与了植物生长发育中几乎所有的生物物理和生物化学过程, 能催化多种酶的合成, 提高植物对氮的吸收利用(林伟山等, 2022)。生态化学计量学通过阐明生态系统中 C、N、P 等元素的平衡的化学计量比, 揭示不同化学元素之间的相互作用和相互制约关系(贺金生等, 2010)。近年来, 生态化学计量学在对生态系统中的养分循环与能量流动的研究中被广泛应用, 在陆地生态系统和山地生态系统中的研究逐渐增多(卢建男等, 2022; 黄伟佳等, 2023; 刘靖宇等, 2023)。

黄河三角洲拥有丰富的生态资源, 有滨海湿地、海滩和沙洲、盐碱地、农田和水稻田、城市和人工景观

的 5 种生态类型, 是暖温带保存最完整、最年轻的湿地生态系统(Fan et al., 2012), 受黄河频繁改道、泥沙运输、人为活动等影响, 黄河的河道经常发生变化, 泥沙淤积和河口地形的改变使得河口湿地的面积以及位置变化、植被覆盖度变低、群落结构由复杂变得简单(李燕妮等, 2022)。此外, 在 20 世纪 70 年代末, 因互花米草有很强的护堤、固滩能力被用作水土保持和生态修复而引入国内(王虹扬等, 2006; 于海燕等, 2010; 闫小玲等, 2012; 陈宝雄等, 2020)。该物种凭借盐腺和发达的通气组织, 耐盐耐干旱能力强, 无性繁殖和抗逆性强, 挤压了其他植物生存空间, 使湿地和水体退化, 农田渔业受损, 严重威胁中国滨海湿地生态系统安全(Zheng et al., 2023)。2010 年监测到黄河三角洲自然保护区内有互花米草分布, 面积为 0.626 km², 呈斑块状分布于南部核心区范围内。2015 年, 互花米草面积扩大, 增至 4.381 km², 增幅近 600%, 新增互花米草斑块位于河口

湿地向海前缘,为泥滩向互花米草转化(刘展航等, 2022)。在自然和人类活动影响下,黄河三角洲现存典型的自然植被有互花米草(*Spartina alterniflora*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australis*)和怪柳(*Tamarix chinensis*),农作物主要有棉花(*Gossypium spp.*)、大豆(*Glycine max*)、高粱(*Sorghum bicolor*)和玉米(*Zea mays*)(孙德斌等, 2022)。鉴于黄河三角洲生态类型的独特性及湿地保护的重要性,黄河三角洲植被对土壤营养成分影响研究受到学术界的高度关注。已有研究发现,不同植被会对土壤营养成分产生不同影响,如,林草复合模式可显著改善滨海盐碱地的土壤理化性能,增加土壤孔隙度和贮水量,降低土壤密度,提高土壤有机质、速效养分含量和土壤微生物数量(孙佳, 2022);人工栽植的刺槐林地土壤理化性状优于天然更新的怪柳林地和人工耕作的棉花地(丁晨曦等, 2013);盐碱荒地的含盐量最高耕地最低,林地(乔木林地、乔灌混交林地)的土壤含盐量也较低;黄河三角洲耕地的养分状况最好,草地、乔木林地和乔灌混交林地较好,灌木丛地较差,养分状况最差的为盐碱荒地(邢尚军等, 2008)。不同土地利用方式下,黄河三角洲麦田土壤有机碳含量较高,为 12.14 g/kg,显著高于其他土地利用方式,其次为翅碱蓬地,芦苇地、棉田和裸地土壤有机碳含量较低,而三者之间的差异不显著(刘艳丽等, 2015);黄河三角洲不同植被类型下土壤中盐分、有机质、N、P 等含量及土壤的机械组成都表现出一定的规律性,说明人类对土地的利用方式受土壤性质的

制约,不同的土地利用方式反过来也会对土壤产生影响(王海梅等, 2006)。这些研究为理解黄河三角洲植被与土壤营养关系奠定了良好的基础。但是,从典型植被种类来看,过去的研究集中在自然植被,且自然植被和农田作物的样本种类较少。基于此,本研究在山东黄河三角洲地区采集了不同植被类型覆盖下 0~30 cm 的土壤样品,分析自然生态系统和农田生态系统中土壤 C、N、P、K 含量及其生态化学计量特征的差异,以期对综合评估互花米草入侵的生态影响以及不同土地利用条件对土壤的营养成分的影响提供借鉴。

1 区域背景

1.1 研究区概况

研究区位于黄河口国家公园及利津以下黄河生态保护带(图 1),面积为 3 554 km²(E 118°07'~119°10', N 37°21'~38°10', 其中高粱和玉米、棉花和 大豆、芦苇和怪柳采样点重合)。该区域为暖温带季风型大陆性气候,多年平均降水量 551.6 mm,蒸发量 1 928.2 mm,多年平均气温 12.5 °C。黄河口国家公园内由海向陆优势植被为互花米草、翅碱蓬、芦苇、怪柳等。同时,农业在黄三角地区经济发展中占据较大比重,主要种植玉米、棉花、大豆、高粱、水稻等(谢旭等, 2021)。

1.2 样地设置及样品采集

2022 年 8 月,在研究区内选取种植棉花、大豆、

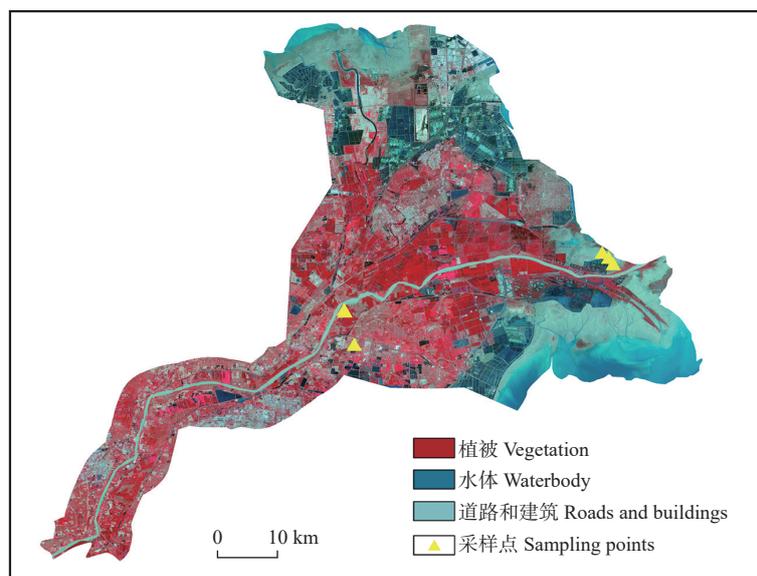


图1 研究区域和采样点位置

Fig. 1 Location of the study area and samples collection site

高粱和玉米的农田,天然植被互花米草、翅碱蓬、芦苇、柽柳及裸土的样地,采集土壤和植被的样品。样品采集过程中,采用5点取样法,即在1m×1m的样地4个角及中心位置采集土壤样品。考虑到植被根系发育特征,在各取样点按0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm采集土壤样品,放置在取样袋内;在各群落内选择长势均一的样点,覆盖度约为80%,每个采样点内选择3个优势种分布均匀的样方,作为重复,样方面积1m×1m,翅碱蓬群落收集样方中所有样品,对收集到的整株样品分为地上部分和地下部分;芦苇、互花米草和柽柳群落由于根系发达,无法全部收集根系,故挖取1m×1m×1m区域内的根系。现场清洗收割获得的样品,分别装入聚乙烯塑料封口袋保存,密封运送至山东省地质科学研究院实验室,测定天然植被和土壤营养成分(C、N、P、K)。

1.3 样品测试

全磷质量分数采用波长色散X射线荧光光谱法(HJ 780-2015),有机碳质量分数采用重铬酸钾容量法(DZ/T 0279.27-2016),全氮的质量分数采用自动定氮

仪法(NY/T 1121.24-2012)。植物样有机碳的测定方法依据:《区域地球化学样品分析方法 第27部分:有机碳量测定 重铬酸容量法》(DZ/T0279.27-2016);总氮、全磷、全钾的测定依据《植物中氮、磷、钾的测定 凯氏定氮仪法》(NY/T 2017-2011)以及《食品安全国家标准食品中多元素的测定(第二法)》(GB 5009268-2016)。

1.4 数据处理

采用双因素方差分析法对土壤的C、N、P、K含量及其化学计量比进行差异显著性检验,用Dunnett法进行事后检验,用Pearson法对土壤的C、N、P、K含量及其生态化学计量比特征与土壤性质进行相关性分析。使用Microsoft Excel 2013与SPSS 19.0对数据进行统计分析,使用Origin 2018进行绘图。

2 结果

2.1 天然植被碳、氮、磷和有机碳含量

由图2可知,互花米草、芦苇、柽柳和翅碱蓬茎

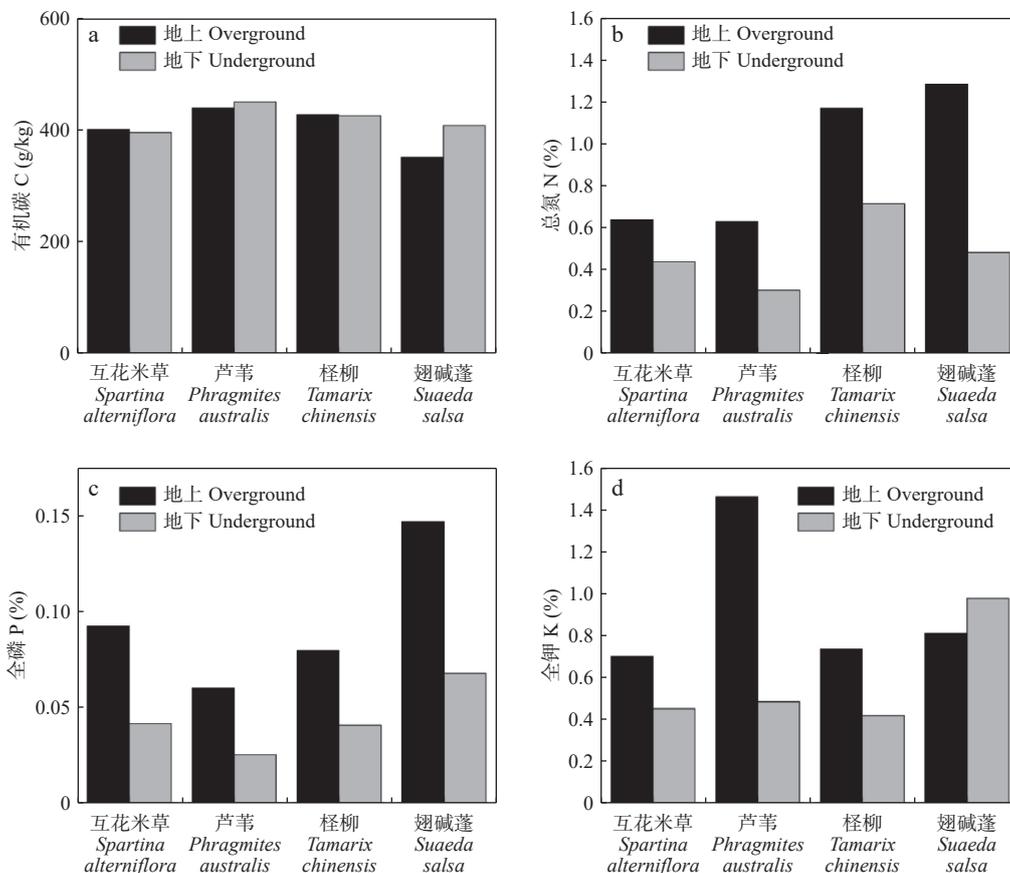


图2 天然植被根、茎叶中的有机碳(a)、总氮(b)、全磷(c)和全钾(d)含量

Fig. 2 (a) C, (b) N, (c) P and (d) K contents in natural vegetation

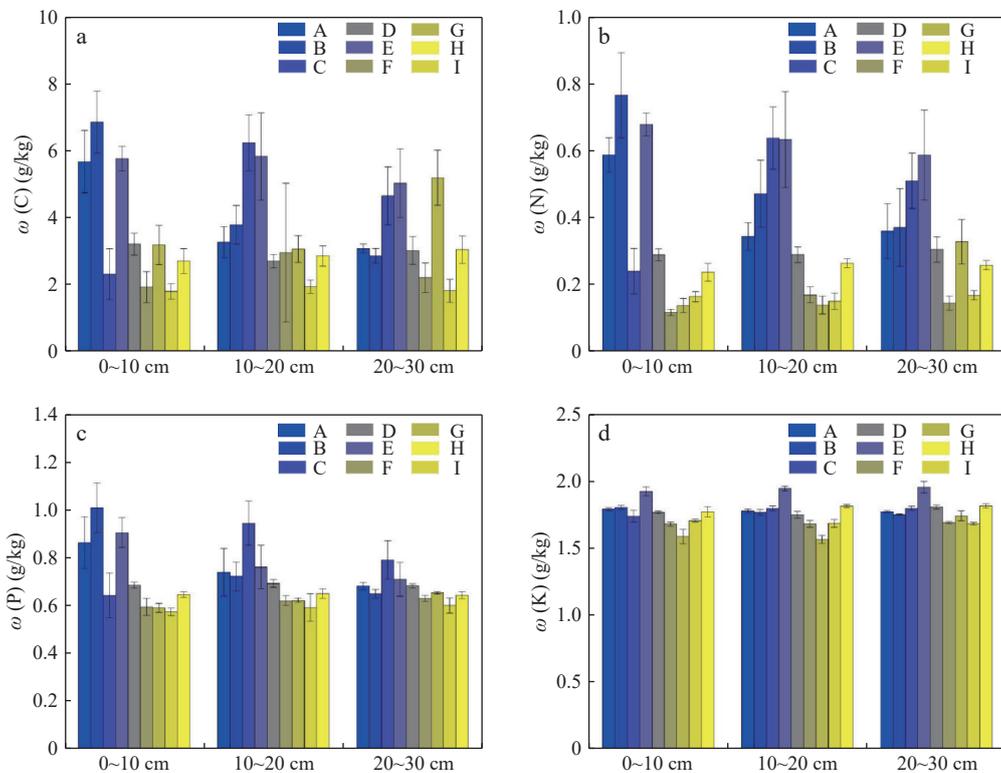
叶的总氮、全磷含量都大于根的含量。植被总氮含量规律为, 翅碱蓬的总氮茎叶含量最高, 为 12.85 g/kg, 比地下根部分氮含量高 266.48%; 柽柳茎叶总氮含量也比较高, 为 11.69 g/kg, 比地下根部分 N 含量高 163.90%; 护花米草叶与根总氮含量较低, 茎叶的总氮含量为 6.39 g/kg, 根的总氮含量为 0.437%。植被全磷含量特征为, 翅碱蓬茎叶的全磷含量较高, 为 1.47 g/kg, 比地下根部分全磷含量分别高 216.77%; 互花米草、芦苇和柽柳茎叶全磷含量较低, 分别为 0.93 g/kg、0.60 g/kg 和 0.80 g/kg, 比地下根部分全磷含量分别高 222.76%、236.83% 和 195.73%。

植被地上和地下全钾含量较总氮和全磷含量略为复杂。除翅碱蓬外, 其他天然植被茎叶的全钾含量都大于根的含量。翅碱蓬的地上全钾含量为 8.11 g/kg, 比地下全钾含量低 17.14%。芦苇地上部分的 TK 含量最高, 为 14.6 g/kg, 是地下部分的 302.01%。互花米草和柽柳地上部分的 TK 含量分别为 0.701 g/kg 和 0.737 g/kg, 为地下部分 TK 含量的 155.42% 和 175.79%。不同物种有机碳地上和地下含量差异较大, 其中翅碱蓬、芦苇茎叶的有机碳含量小于根的含量, 但互花米

草和柽柳茎叶的有机碳含量大于根的含量。不同植被中有机碳含量差别最大的是翅碱蓬, 地上部分含量分别为 350 g/kg, 为地下部分的 86.05%, 其他 3 种物种地上和地下部分有机碳含量较为接近。互花米草、芦苇、柽柳和翅碱蓬 4 种天然植被的 N/P 分别为 8.02, 10.90, 15.64, 8.23。

2.2 农田土壤养分分布特征

不同作物农田土壤中的营养成分见图 3。农田土壤中玉米、大豆、棉花的有机碳、全磷、全氮在 0~10 cm 土层里含量最高, 在 10~30 cm 土层中含量逐渐减少; 而高粱土壤中的有机碳、全磷、全氮都在 0~10 cm 土层里含量最低, 在 10~30 cm 土层中含量明显增多; 玉米土壤中的有机碳、全氮在不同深度的土层里含量差别不大, 只有全磷含量在 0~10 cm 土层中含量较 10~30 cm 土层高。各种农田土壤中的 K 含量在各土层中相差不大, 在 1.5~2.0 g/kg。由表 1 可知不同植被类型对土壤营养物质的积累有显著性差异, 而不同植被类型在不同土层上对土壤营养物质的含量也有显著性差异, 由事后检验(Dunnnett 法)的结果(表 2)可知, 棉花、大豆、高粱土壤中有有机碳的含量



A. 棉花; B. 大豆; C. 高粱; D. 玉米; E. 互花米草; F. 芦苇; G. 裸土; H. 柽柳; I. 翅碱蓬

图3 不同植被类型样地中不同深度土层的碳(a)、氮(b)、磷(c)、钾(d)含量

Fig. 3 (a)C, (b)N, (c)P and (d)K contents in different soil depth under investigated plants and natural vegetation

表1 植被类型和土壤深度对土壤营养成分的方差分析

Tab. 1 Correlation analyses between vegetation and soil profile depth

	有机碳(C)	全氮(N)	全磷(P)	全钾(K)	$\omega(C)/\omega(N)$	$\omega(C)/\omega(P)$	$\omega(N)/\omega(P)$
不同植被类型	***	***	***	***	***	***	***
不同土壤深度	0.173	0.344	***	***	0.057	0.656	*
植被类型*土壤深度	***	***	***	***	0.258	***	***

注：*、**、***分别代表 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 。

表2 不同植被类型条件下土壤中营养元素的显著性差异分析

Tab. 2 Analysis of significant differences in soil under different vegetation types

植被类型	显著性						
	$\omega(C)$	$\omega(N)$	$\omega(P)$	$\omega(K)$	$\omega(C)/\omega(P)$	$\omega(C)/\omega(N)$	$\omega(N)/\omega(P)$
棉花	0.976	***	***	***	*	***	***
大豆	0.062	***	***	***	0.287	***	***
高粱	0.149	***	***	***	0.124	***	***
玉米	***	***	***	***	*	***	***
互花米草	*	**	*	***	***	***	***
芦苇	***	0.111	0.855	***	***	***	**
怪柳	***	0.43	0.451	***	***	***	0.352
翅碱蓬	**	0.199	0.778	***	***	***	*

注：*、**、***分别代表 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 。

与裸土没有显著性差异,而4种农作物土壤中总磷、总氮、全钾的含量与裸土的相比都具有显著性差异,说明农田利用对土壤的总氮、总磷、全钾含量都有明显作用。由表1可知,农田土壤中的碳氮比和碳磷比只在不同植被类型的条件下显示出显著性差异,与土壤深度无显著关系,在不同土层上受不同植被覆盖条件的影响也有显著性差异;由事后检验的结果(表2)可知,除大豆、高粱的碳磷比与土壤的无显著性差异外,其余各农田植被覆盖下的土壤与裸土的各种化学计量比均有显著性差异。中国土壤碳氮比(10.1~12.1),由图4可见,农田土壤中的碳氮比都较低且相差不大,可能与长期施肥有关,造成N损失,而高粱的碳磷比和氮磷比在0~10 cm土层中都较低;玉米的碳磷比和氮磷比在各土层中最高。

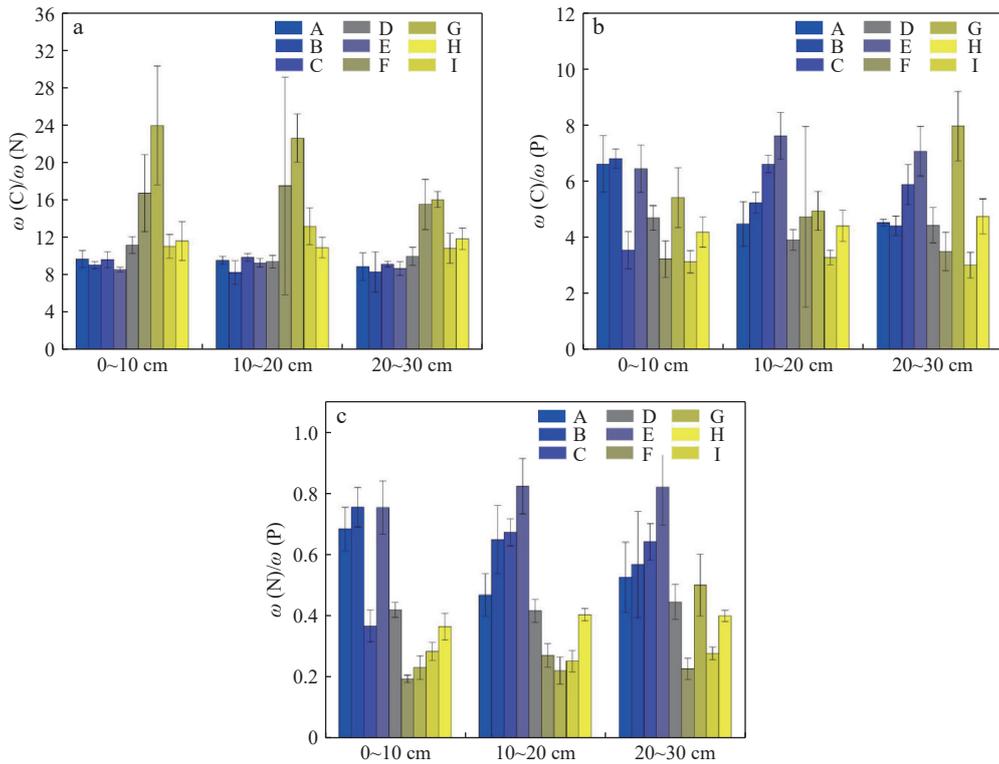
2.3 自然植被生态系统中土壤养分分布规律

由图3可以看出,自然植被覆盖的土壤在0~30 cm土层中有机碳、总氮、总磷、全钾的含量各层之间差异不大;芦苇的有机碳和总氮在10~30 cm土层中较在0~10 cm土层中略高;而裸土的总碳、总氮含量反而在20~30 cm土层中最高。各土层翅碱蓬和互花米

草的总碳、总氮含量都比芦苇和怪柳的要高;各自然植被有机碳的含量都比裸土的低;互花米草和裸土的总氮含量在20~30 cm土层中比其他自然植被的要高出一倍;由表2可以看出4种自然植被土层中的有机碳和全钾含量与裸土相比都具有显著性差异;而只有互花米草土壤中的总氮和总磷含量与裸土的有显著性差异,其余3种不具备明显差异。由表2可知,只有怪柳的氮磷比和裸土的无显著性差异,其余各自然植被的各个化学计量比都与裸土的有显著性差异;由图4可以看出自然植被生态系统中各土层的碳氮比和碳磷比比裸土的均低,且芦苇的碳氮比高于蓬蒿和怪柳高于互花米草;0~10 cm土层只有芦苇的氮磷比比裸土的低;而10~20 cm土层各自然植被土壤的 $\omega(N)/\omega(P)$ 比裸土的均高;在20~30 cm土层中裸土的氮磷比最高。

3 讨论

植物的生长与发育受到多个因素的调控,包括植物器官的形态、产量与物种组成,以及养分的吸收、



A.棉花; B.大豆; C.高粱; D.玉米; E.互花米草; F.芦苇; G.裸土; H.柽柳; I.翅碱蓬
(a).碳氮比; (b).碳磷比; (c).氮磷比

图4 不同植被类型不同深度土层的化学计量比

Fig. 4 Stoichiometric ratios of soil nutrients at different soil depth under different vegetation stand

利用和分配 (Santhi et al., 2005)。不同植物的养分含量和相对丰度不同, 表现为养分生态化学计量特征的差异, 来应对环境的改变。黄河三角洲地区 4 种天然植被的有机碳含量比较接近, 这与 C 元素主要是结构性物质, 参与植物体的结构构成, 不容易受外界环境的干扰有关 (李霞等, 2022)。而三角洲地区翅碱蓬的根部有机碳含量比茎叶部分有机碳含量高, 这与其根部在植物的生存中扮演着抗逆的重要角色有关。在干旱和盐碱环境中, 根部的有机碳含量增加可能是为了提高植物的抗逆性。高碳含量可以帮助植物维持水分平衡、抵御氧化逆境和减轻盐胁迫。Koerselman 等 (1996) 在湿地采用施肥实验来验证养分影响植物生长的机制, 得出了养分限制能够推动生态系统发展的结论, 尤其是氮和磷限制。具体研究结果表明, 当 $N/P < 14$ 时, 植物生长受氮元素限制; 当 $N/P > 16$ 时, 限制性元素为磷; 当 $14 < N/P < 16$ 时, 植物的生长同时受氮和磷的限制或者均不受氮磷限制。黄河三角洲地区互花米草、柽柳和翅碱蓬的氮磷比低于 11, 受氮限制。由于研究区域植物的差异性, 通过施肥对比试验得出的 N/P 临界值也不大相同, Hoofman

(1999) 得出的 N/P 临界值分别为 10 和 14, 在内蒙古典型草原进行实验, 得出的临界值分别为 21 和 23 (Zhang et al., 2004)。

如表 1 所示, 植被类型对土壤的 C、N、P、K 含量都有着显著影响, 而土层深度只对土壤的 P、K 含量有显著影响, 植被类型和土壤深度的复合作用对土壤中的 C、N、P、K 含量有显著影响。据图 3 和表 2, 互花米草和裸土的有机碳的含量在 20~30 cm 深的土层中有显著性差异, 且互花米草对 0~10 cm 土层有机碳的积累有促进作用, 对 10~30 cm 土层有机碳的积累有抑制。而互花米草和裸土的全氮含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 的土层中都有显著性差异, 在 20~30 cm 的土层中没有显著差异, 不同植被类型对土壤中 N 的积累影响差异较大, 而互花米草对不同土层土壤的 N 积累都表现出抑制效果。互花米草和裸土的 TP、TK 含量在各土层都表现出显著性差异, 对全 TP 含量的影响随土层深度变化不大, 但都有促进土壤积累的趋势, 而对土壤 K 的积累无明显作用。而天然植被土壤和农田土壤中的 K 含量相差并不大, 可能是与天然植被和农作物都需要 K 来支持其生长有关 (李霞等,

2022)。K对植物的光合作用、酶活性及水分调节等至关重要。因此,它们在生长过程中对K的吸收会影响土壤中K的动态平衡。由图4可知,自然植被生态系统不同土层深度的 $\omega(C)/\omega(N)$ 比农田生态系统都要高,而 $\omega(C)/\omega(P)$ 和 $\omega(N)/\omega(P)$ 比农田生态系统都要低,可能与农田生态系统施加磷肥有关。

互花米草入侵不仅会影响滨海湿地碳循环,对氮循环同样有重要影响(陆琳莹等,2020)。相关研究表明,互花米草入侵后会促进土壤中固氮菌的丰度与数量增加,进而将土壤中N元素转化成更利于植物吸收的形式。本研究中互花米草土壤TN含量要比其他自然植被高出一倍,与金宝石等在长江口、闽江河口等滨海湿地的研究结果一致(金宝石等,2017;郑浩等,2022)。互花米草入侵引起表层土壤TN含量的积累,这与互花米草入侵促进了土壤有机氮的硝化作用与矿化作用密切相关(韩广轩等,2021)。在闽江河口的研究发现互花米草入侵降低了土壤硝态氮含量,但显著增加了铵态氮含量,因此土壤TN含量显著增加(李家兵等,2017)。本研究中,互花米草湿地表层土壤TN含量与深层土壤相当,这与闽江河口、胶州湾等互花米草湿地土壤表层氮含量显著高于底层氮的特征不同,可能与不同土壤背景值有关(苗萍,2018)。

研究表明不同土地利用方式下土壤的化学性状指标存在很大差异(宇万太等,2007)。其中,自然植被生态系统中裸土的有机碳含量最高,而农田生态系统的养分状况最好,从不同土地利用类型的施肥习惯比较来看,农田土壤化肥施用比例大于菜地且肥料品种相对较多,在不同作物吸收利用影响下,土壤可溶性有机碳和氮之间相关关系变得复杂(吕学军等,2011);而未利用地则无肥料施入,其土壤可溶性有机碳和氮的相关关系完全受自然因素的控制。在自然生态系统中裸土的有机碳含量最高,可能与浮游动物与植物残骸的自然输入以及陆源人为输入有关。

4 结论

(1)与裸土相比,农业利用使土壤尤其是表层土壤的有机碳和总氮含量显著增加,增幅随土层深度增加而减弱,但对土壤总磷总钾含量基本无影响。

(2)自然植被中只有互花米草在浅层土壤中的营养成分与裸土相当,其余自然植被对土壤的营养成分都呈现消耗作用。

(3)植被类型对土壤有机碳总氮总磷含量有显著影响,但植被类型和土层深度这两种因素对土壤全磷的影响没有交互作用,对土壤有机碳和全氮的含量有交互影响;植被类型对土壤各营养元素总磷含量的显著影响;土壤深度与有机碳含量和全氮含量均没有显著相关性。

(4)自然植被生态系统不同土层深度的 $\omega(C)/\omega(N)$ 均高于农田生态系统,而 $\omega(C)/\omega(P)$ 和 $\omega(N)/\omega(P)$ 比农田生态系统均低。

参考文献(References):

- 陈宝雄,孙玉芳,韩智华,等.我国外来入侵生物防控现状、问题和对策[J].生物安全学报,2020,29(3):157-163.
- CHEN Baoxiong, SUN Yufang, HAN Zhihua, et al. Challenges in preventing and controlling invasive alien species in China[J]. Journal of Biosafety, 2020, 29(3): 157-163.
- 丁晨曦,李永强,董智,等.不同土地利用方式对黄河三角洲盐碱地土壤理化性质的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(2):84-89.
- DING Chenxi, LI Yongqiang, DONG Zhi, et al. Effects of different land use modes on physical and chemical properties of saline-alkali soil in Yellow River Delta[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 84-89.
- 韩广轩,李隽永,屈文笛.氮输入对滨海盐沼湿地碳循环关键过程的影响及机制[J].植物生态学报,2021,45(4):321-333.
- HAN Guangxuan, LI Junyong, QU Wendi. Effects of nitrogen input on carbon cycle and carbon budget in a coastal salt marsh[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(4): 321-333.
- 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6.
- 黄伟佳,刘春,刘岳,等.南岭山地不同海拔土壤生态化学计量特征及影响因素[J].生态环境学报,2023,32(1):80-89.
- HUANG Weijia, LIU Chun, LIU Yue, et al. Soil ecological stoichiometry and its influencing factors at different elevations in Nanling Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(1): 80-89.
- 黄勇,欧阳渊,刘洪,等.地质建造对土壤性质的制约及其生态环境效应—以西昌地区红壤为例[J].西北地质,2023,56(4):196-212.
- HUANG Yong, OUYANG Yuan, LIU Hong, et al. Restriction of Geological Formation on Soil Properties and Its Ecological Environmental Effects: Example from Red Soil in the Xichang Area[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 196-212.

- 金宝石, 闫鸿远, 章文龙, 等. 互花米草入侵下闽江河口沼泽土壤中各形态氮含量和储量[J]. 湿地科学, 2017, 15(3): 375-384.
- JIN Baoshi, YAN Hongyuan, ZHANG Wenlong, et al. Contents and storages of various forms of nitrogen in soils of wetlands in the Min River Estuary under *Spartina alterniflora* invasion[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(3): 375-384.
- 李家兵, 张党玉, 吴春山, 等. PH对闽江河口湿地沉积物氮素转化关键过程的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 272-278.
- LI Jiabing, ZHANG Dangu, WU Chunshan, et al. Effects of PH on the key nitrogen transformation processes of the wetland sediment in the Min River Estuary[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 272-278.
- 李霞, 陶韦, 皮赛, 等. 滨海盐沼湿地翅碱蓬碳、氮、硫含量及其生态化学计量研究[J]. 环境生态学, 2022, 4(11): 57-62.
- LI Xia, TAO Wei, PI Sai, et al. Content and ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and sulphur of *Suaeda heteroptera* in coastal salt marsh wetlands of China[J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(11): 57-62.
- 李燕妮, 李鹏, 吴晓, 等. 黄河口湿地时空变化过程及其主控因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 68-80.
- LI Yanni, LI Peng, WU Xiao, et al. Tempo-spatial variation of wetlands at the Yellow River Mouth and its control factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 68-80.
- 林伟山, 德科加, 向雪梅, 等. 天然草地植被-土壤系统碳、氮、磷(钾)库的时空分布格局研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(2): 45-51.
- LIN Weishan, DE Kejia, XIANG Xuemei, et al. Research progress on spatial and temporal distribution pattern of C, N, P (K) pools in vegetation-soil system of natural grassland[J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Science*, 2022, 52(2): 45-51.
- 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.
- LIU Yanli, LI Chengliang, GAO Mingxiu, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5183-5190.
- 刘展航, 张树岩, 侯玉平, 等. 互花米草入侵对黄河口湿地土壤碳氮磷及其生态化学计量特征的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1360-1369.
- LIU Zhanhang, ZHANG Shuyan, HOU Yuping, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon, nitrogen, phosphorus and their ecological stoichiometric characteristics in the Yellow River Estuary wetlands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1360-1369.
- 刘靖宇, 蒋磊, 尹立河, 等. 塔里木盆地东北缘绿洲区土壤养分特征及主控因素分析[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 141-152.
- LIU Jingyu, JIANG Lei, YIN Lihe, et al. Soil Nutrient Characteristics and Main Controlling Factors in the Oasis Zone of the Northeastern Margin of Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 141-152.
- 卢建男, 刘凯军, 王瑞雄, 等. 中国荒漠植物-土壤系统生态化学计量学研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 173-182.
- LU Jiannan, LIU Kaijun, WANG Ruixiong, et al. Research advances in stoichiometry of desert plant-soil system in China[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 173-182.
- 陆琳莹, 邵学新, 杨慧, 等. 浙江滨海湿地互花米草生长性状对土壤化学因子的响应[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 177-183.
- LU Linying, SHAO Xuexin, YANG Hui, et al. Response of *Spartina alterniflora* growth to soil chemical properties in coastal wetland of Zhejiang[J]. *Forest Research*, 2020, 33(5): 177-183.
- 吕学军, 刘庆, 陈印平, 等. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 505-508.
- LV Xuejian, LIU Qing, CHEN Yinping, et al. Effect of Different Land Use Types on Soil Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in Yellow River Delta[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(4): 505-508.
- 苗萍. 胶州湾互花米草湿地秋冬季 CH_3Cl 与 CH_3Br 排放通量的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- MIAO Ping. Study on CH_3Cl and CH_3Br emission flux in autumn and winter of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.
- 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3241-3252.
- SUN Debin, LI Yunzhao, YU Junbao, et al. Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3241-3252.
- 孙佳. 黄河三角洲滨海滩涂怪柳根系形态及生长的水盐适应规律[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022, 79.
- SUN Jia. Water-Salt Adaptation of Root Morphology and Growth of *Tamarix chinensis* on the Coastal Beach in the Yellow River Delta[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022, 79.
- 王海梅, 李政海, 宋国宝, 等. 黄河三角洲植被分布、土地利用类型与土壤理化性状关系的初步研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2006, (1): 69-75.
- WANG Haimei, LI Zhenghai, SONG Guobao, et al. The Correlation among Vegetation Distribution Land Use Type and Soil Character in Yellow River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2006, (1): 69-75.
- 王虹扬, 黄沈发, 何春光, 等. 中国湿地生态系统的外来入侵种

- 研究[J]. *湿地科学*, 2006, 4(1): 7-12.
- WANG Hongyang, HUANG Shenfa, HE Chunguang, et al. Invasive Species in Wetland Ecosystems China[J]. *Wetland Science*, 2006, 4(1): 7-12.
- 谢旭, 李晓文, 白军红, 等. 黄河三角洲湿地中4种典型植物地上生物量随地表高程的变化规律[J]. *湿地科学*, 2021, 19(2): 226-231.
- XIE Xu, LI Xiaowen, BAI Junhong, et al. Variations of Above-ground Biomass of 4 Kinds of Typical Plants with Surface Elevation of Wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Wetland Science*, 2021, 19(2): 226-231.
- 邢尚军, 张建锋, 宋玉民, 等. 黄河三角洲盐碱地不同土地利用方式下土壤化学性状与酶活性的研究[J]. *林业科技*, 2008, (2): 16-18.
- XING Shangjun, ZHANG Jianfeng, SONG Yumin, et al. Study on Soil Chemical Properties and Enzymatic Activities of Saline-Alkali Land under Different Land Utilization Modes in the Yellow River Delta[J]. *Forestry Science & Technology*, 2008, (2): 16-18.
- 闫小玲, 寿海洋, 马金双. 中国外来入侵植物研究现状及存在的问题[J]. *植物分类与资源学报*, 2012, 34(3): 287-313.
- YAN Xiaoling, SHOU Haiyang, MA Jinshuang. The Problem and Status of the Alien Invasive Plants in China[J]. *Plant Diversity and Resource*, 2012, 34(3): 287-313.
- 于海燕, 邵卫伟, 韩明春, 等. 浙江省典型生态系统外来入侵物种调查研究[J]. *中国环境监测*, 2010, 26(5): 70-74.
- YU Haiyan, ZHAO Weiwei, HAN Mingchun, et al. Studies on the Invasive Species of Typical Eco-System in Zhejiang Provinc[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2010, 26(5): 70-74.
- 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. *生态学杂志*, 2007(12): 2013-2016.
- YU Wantai, MA Qiang, ZHAO Xin, et al. Changes of Soil Active Organic Carbon Pool under Different Land Use Types[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(12): 2013-2016.
- 郑浩, 刘明月, 杨晓芑, 等. 中国大陆沿海地区互花米草生长特征及其对环境因子的响应[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 3026-3034.
- ZHENG Hao, LIU Mingyue, YANG Xiaowu, et al. Growth characteristics of *Spartina alterniflora* and its response to environmental factors in coastal areas of mainland China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3026-3034.
- Fan X, Pedrol B, Liu G, et al. Soil salinity development in the Yellow River Delta in relation to groundwater dynamics[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2): 175-189.
- Hoofman B D A P. The Resource Balance Hypothesis of Plant Species Diversity in Grassland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(2): 187-200.
- Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N: P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33: 1441-1450.
- Santhi R, Natesan R, Selvakumari G. Effect of Soil Fertility and Integrated Plant Nutrition System on Yield, Response and Nutrient Uptake by *Aggregatum* Onion[J]. *Indian Journal of Agricultural Research*, 2005(3): 213-216.
- Zhang Lixia, Bai Yongfei, Han Xingguo. Differential Responses of N: P Stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N Additions in a Steppe Ecosystem in Nei Mongol[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2004(3): 259-270.
- Zheng Meijie, Zhang Zhongsheng, Jiang Shan, et al. *Spartina alterniflora* invasion changed enrichment and coupling characteristics of multiple elements in coastal marsh sediment of the Yellow River Delta[J]. *Applied Geochemistry*, 2023, 148: 105517.