

黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征

王玲玲^{1,3} 孙志高^{1*,2} 牟晓杰^{1,3} 孙万龙⁴

(1.中国科学院 烟台海岸带研究所 滨海湿地生态实验室,山东 烟台 264003;2.厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室 滨海湿地生态系统教育部重点实验室,福建 厦门 361005;3.中国科学院 研究生院 北京 100039;4.中国农业大学 山东 烟台 264670)

摘要 对黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮分布特征进行了对比研究。结果表明,湿地土壤氮以有机氮为主,无机氮所占比例较低且以铵态氮为主。土壤氮水平分布特征明显,TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量较高的分别是芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地(过渡带)湿地和芦苇湿地,土壤氮垂直分布特征亦明显,表现为表层土壤氮含量大于下层,其中,TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量垂直变化最明显的分别是三棱蔗草—朝天委陵菜湿地、碱蓬湿地和芦苇湿地。影响土壤氮分布的主要因素有水分条件、植被类型及微生物活动等。相关分析表明 TN 与有机氮、有机质呈极显著正相关($P < 0.01$),NH₄⁺-N 与 TP 呈显著负相关($P < 0.05$)。研究发现,植被对调整湿地氮的空间分布有一定作用,从而为湿地生态修复提供了理论依据。

关键词 黄河口 滨岸潮滩 土壤氮 分布特征

中图分类号 S153.6 文献标识码:A 文章编号 0564-3945(2011)06-1439-07

土壤是植物的营养库之一,植物除向大气摄取所需的碳、氧等营养物质外,还必须从土壤中获得大部分营养物质来满足其生存需要。湿地土壤是氮的重要储库,发挥着源、汇或转化器的重要功能^[1],其对于湿地系统诸生态过程有着重要影响。全氮是湿地土壤营养水平的重要指示物,硝态氮和铵态氮是两种可被植物直接吸收利用的有效态氮,其含量变化显著影响着湿地土壤氮的迁移与转化过程。湿地土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量的变化特征不仅可反映出湿地土壤的养分供给状况及其可利用水平^[2],而且还在一定程度上对湿地植物群落组成、湿地系统生产力以及湿地系统的稳定与健康等产生深刻影响^[3-5]。不同类型湿地土壤营养状况的差异影响着湿地生态系统类型和湿地植被群落的形成过程;同样,湿地植被群落的变化也影响着不同湿地土壤养分的空间分布差异。

黄河三角洲是我国暖温带最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统,其土壤形成时间相对较短。目前,国内已对该区域土壤营养元素的分布规律开展了一定的研究,但这些研究多集中于某些典型湿地的营养元素转化和空间分布方面^[6-9],而对于自然状态下同一区域不同类型湿地土壤营养元素含量及分布特征的对比研究还不多见。鉴于此,选择黄河口滨岸潮滩不同类型湿地为研究对象,通过对不同类型湿地土壤氮

分布规律的对比研究,揭示湿地土壤氮的空间分布特征与植被类型之间的相互关系,以为黄河三角洲湿地土壤氮循环研究提供基础数据,并为该区湿地生态系统的恢复、保护和管理提供科学依据。

1 研究区域

研究样地位于山东省黄河三角洲国家级自然保护区(37°40'N~38°10'N,118°41'E~119°16'E)今黄河入海口滨岸潮滩湿地,属暖温带季风气候区,具有明显的大陆性季风气候特点,雨热同期,四季分明,冷热干湿界限极为明显。该区年平均气温 12.1℃,无霜期 196 d,≥10℃的积温约 4300℃,年均蒸发量 1962 mm,年均降水量为 551.6 mm,70%的降水集中于 7、8 月份。保护区的土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,淡水缺乏,地下水位较浅,水质矿化度较高,土壤向积盐方向发展,湿地植被群落演替频繁,且逆向演替明显。区域内地势平坦,自然坡降 1/8000~1/12000,生态格局时空变化迥异,湿地类型多样,植被以草甸为主,林木稀少,自黄河口滨岸至潮滩的植被类型依次为:三棱蔗草—朝天委陵菜(*Sparganiaceae-P.supina L.*)群落、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)群落、白茅—旱柳(*Imperata cylindrica-Salix matsudana Koidz*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群

收稿日期 2010-04-22;修订日期 2010-06-28

基金项目 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室基金(200906)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)、国家自然科学基金项目(40803023)、厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室高级访问学者基金(MELRS0918)、厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室基金(Cwe10903)、中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动基金项目(AJ0809BX-036)、中国科学院烟台海岸带所前沿领域项目(HJ0810BX-047)和山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2007KFJ101)资助

作者简介 王玲玲(1985-),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事湿地生物地球化学研究。E-mail:wangll2009@163.com

* 通讯作者 E-mail:zgsun@yc.ac.cn

落、碱蓬—芦苇(*Suaeda salsa-Phragmites australis*)群落、碱蓬—柽柳(*Suaeda salsa-Tamatis chinensis Lour*)群落、碱蓬—柽柳(*Suaeda salsa-Tamatis chinensis Lour*)群落(过渡带)和碱蓬(*Suaeda salsa(L.)Pall*)群落。

2 研究方法

2.1 样区选择与样品采集

2008年8月,按照“典型性、代表性”的原则,在黄河入海口北部选择未受人类活动扰动的滨岸潮滩,土壤类型为潮土,按照湿地植物群落类型布设9个采样区(见表1)。采样时,每个典型样区采集3个土壤剖面,剖面深度为60cm,每10cm一层,共6层,然后对3个剖面样品进行等层次混合,共采集样品54个。

表1 采样区及坐标

Table 1 The sampling sites and their coordinates

样区编号 Numeration	湿地类型 Types of wetland	样点坐标 Coordinates
A	三棱蔗草-朝天委陵菜湿地	37°45'48.3''N,119°09'45.0''E
B	假苇拂子茅湿地	37°45'49.3''N,119°09'44.6''E
C	白茅-旱柳湿地	37°45'50.3''N,119°09'43.4''E
D	芦苇湿地	37°45'51.5''N,119°09'42.9''E
E	芦苇-碱蓬湿地	37°45'53.6''N,119°09'42.0''E
F	碱蓬-柽柳湿地	37°45'57.0''N,119°09'40.7''E
G	碱蓬-柽柳湿地(过渡带)	37°46'35.8''N,119°09'36.0''E
H	碱蓬湿地	37°46'38.9''N,119°09'41.4''E
I	光滩湿地	37°46'41.1''N,119°09'41.3''E

2.2 样品处理及测定

将采集的土样带回实验室,自然风干后拣去石块、植物残根等杂物,用球磨机磨碎,过100目筛后装袋待测。土壤样品分析项目包括全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、全磷(TP)、全硫(TS)、有机质(SOM)等。其中,全氮含量采用凯氏法测定,铵态氮采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全硫采用硝酸镁氧化-硫酸钡比色法测定,有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定。有机氮(OR-N)采用差减法,即OR-N = TN - NH₄⁺-N - NO₃⁻-N。由于凯氏法测定的TN中基本上不包含固定态铵、硝态氮和亚硝态氮,所以OR-N的含量可由TN和NH₄⁺-N的差值来粗略表示^[10]。

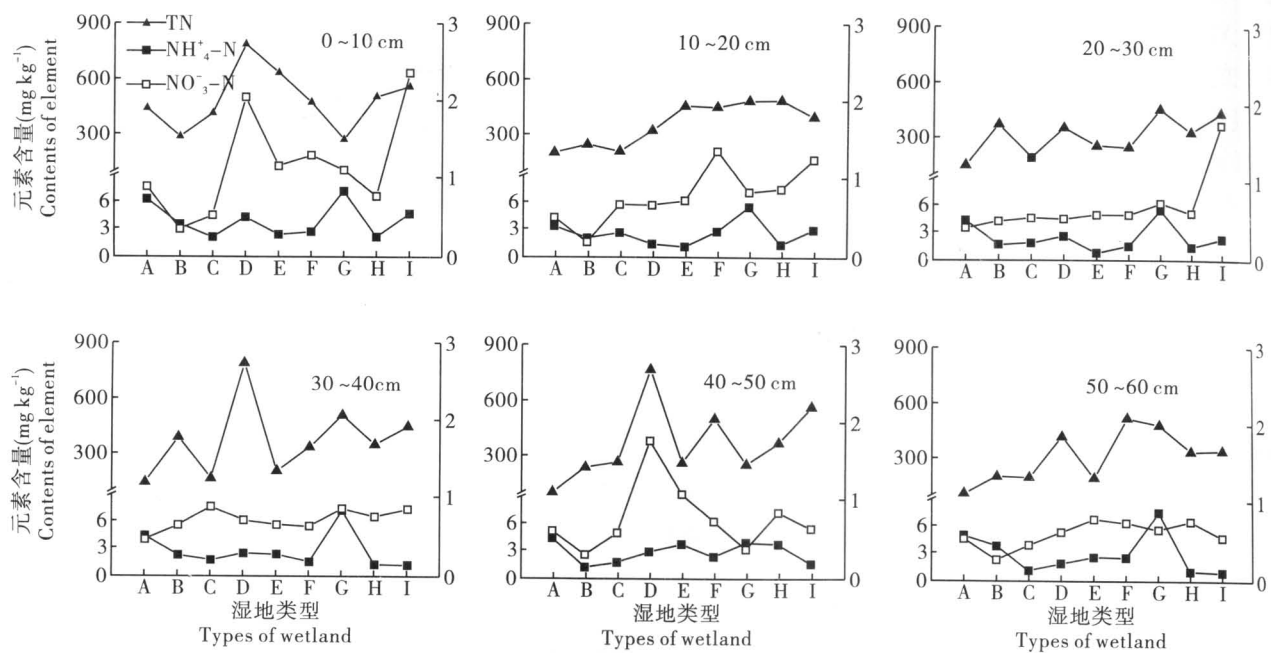
2.3 数据处理与分析

运用 Origin 7.5 和 SPSS 10.0 软件对数据进行作图、计算和相关分析。

3 结果与分析

3.1 不同类型湿地土壤氮素水平分布特征

图1为黄河口滨岸潮滩不同湿地土壤氮素的水平分布特征。据图可知,黄河口滨岸潮滩不同类型湿地全氮含量均大于100 mg kg⁻¹,而铵态氮和硝态氮则



注:A-三棱蔗草-朝天委陵菜湿地;B-假苇拂子茅湿地;C-白茅-旱柳湿地;D-芦苇湿地;E-碱蓬-芦苇湿地;F-碱蓬-柽柳湿地;G-碱蓬-柽柳湿地(过渡带);H-碱蓬湿地;I-光滩湿地(下同)。

图1 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮的水平分布特征

Fig. 1 Horizontal distribution characteristics of nitrogen in different wetlands soils in intertidal flat of Yellow River Estuary

表 2 黄河口滨岸潮滩不同深度湿地土壤氮素水平分布变异性

Table 2 Variability of nitrogen horizontal distribution in different depths of wetlands soils in intertidal flat of Yellow River Estuary

土壤深度 Depth of soil (cm)	TN			NH ₄ ⁺			NO ₃ ⁻		
	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation
0~10	485.07	162.57	34.51	3.85	1.91	49.55	1.16	0.67	57.88
10~20	367.55	118.28	32.18	2.62	1.39	53.07	0.79	0.36	45.61
20~30	316.98	105.29	33.22	2.48	1.57	63.17	0.69	0.41	58.92
30~40	388.43	201.98	52.00	2.98	1.99	66.78	0.75	0.14	18.31
40~50	386.98	206.12	53.26	2.27	3.12	38.87	0.80	0.44	55.55
50~60	327.30	143.52	43.85	3.18	2.25	70.82	0.62	0.17	26.94

分别小于 8 mg kg^{-1} 和 2.50 mg kg^{-1} 。由此可见,各类型湿地土壤氮素均以有机氮为主,无机氮所占的比例较低,并且水平分布特征明显。由表 2 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素水平分布变异性可知全氮含量在土壤表层差异不大,深层则较大。具体而言,0~10 cm 土壤表层全氮分布整体呈“W”型,最高值为 $786.340 \text{ mg kg}^{-1}$ 出现在芦苇湿地,最低值仅为 $270.530 \text{ mg kg}^{-1}$ 出现在碱蓬-柽柳湿地(过渡带);10~20 cm 土层全氮分布呈现由三棱蔗草-朝天委陵菜湿地到光滩湿地缓慢增大趋势,20~30 cm 土层全氮水平分布呈波动变化,范围为 $157.940 \sim 461.520 \text{ mg kg}^{-1}$;30~40 cm 及 40~50 cm 土层全氮水平分布差异比较大,变异系数均超过 50%,且最高值都出现在芦苇湿地;而在 50~60 cm 土层中,全氮含量分布差异较小整体呈“M”型,芦苇湿地和碱蓬-柽柳湿地含量较高。铵态氮含量在不同类型湿地各土层差异很大,除 40~50 cm 土层变异系数仅为 38.87%外,其余各土层均大于 50%(表 2)且各土层铵态氮最高值几乎都出现在碱蓬-柽柳湿地(过渡带)。其中,在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层中铵态氮分布整体呈“W”型,含量较高的有三棱蔗草-朝天委陵菜湿地、碱蓬-柽柳湿地(过渡带)和光滩湿地,而在 30~40 cm、40~50 cm 及 50~60 cm 土层中铵态氮含量较高的则为三棱蔗草-朝天委陵菜湿地和碱蓬-柽柳湿地(过渡带)。硝态氮含量在不同类型湿地各土层差异也比较大,尤其在 0~10 cm、20~30 cm 及 40~50 cm 土层,变异系数分别达 57.88%、58.92%和 55.55%(表 2)。其中,0~10 cm 和 10~20 cm 土层硝态氮分布整体呈“W”型,含量较高的为芦苇湿地和光滩湿地,20~30 cm 土层硝态氮含量自三棱蔗草-朝天委陵菜湿地到碱蓬湿地变化不大,范围为 $0.409 \sim 0.726 \text{ mg kg}^{-1}$,但在光滩湿地含量却突然增大,高达 1.745 mg kg^{-1} ;40~50 cm 土层硝态氮含量整体也呈“W”型,且最大值出现在芦苇湿地,而 30~40 cm 和 50~60 cm 土层硝态氮含量则差别不

大,变异系数分别为 18.31%和 26.94%(表 2)。

由上可以看出,芦苇湿地土壤各层全氮含量几乎都是最高,这一方面与湿地植被的生物量及根系深浅相关^[1],芦苇湿地主要植被芦苇生物量大,根系较深,一年归还土壤的氮素较其他湿地植被多;另一方面还与湿地的水分条件密切相关,因为水分状况显著影响着湿地对氮的持留能力^[2],芦苇湿地处于滞水或饱和状态,不利于有机氮的矿化分解,从而整个土层的全氮含量都比较大。此外,根系分布较深(集中于 40 cm 以上土壤)的芦苇湿地、碱蓬-柽柳湿地和碱蓬-柽柳湿地(过渡带)下层土壤全氮含量高于根系分布较浅(集中于 20 cm 以上土壤)的三棱蔗草-朝天委陵菜湿地和白茅-旱柳湿地,这主要与植物根系的吸收利用、根系分泌物和细根周转归还有关。另外,不同湿地土壤无机氮均以铵态氮为主,而铵态氮主要来源于氨化细菌对有机氮的分解,所以碱蓬-柽柳湿地(过渡带)土壤各层高铵态氮含量表明其所处环境条件如短期的干湿交替更有利于有机氮的矿化分解^[3]。而三棱蔗草-朝天委陵菜湿地土壤铵态氮含量较高则可能与其地表较弱积水环境抑制硝化作用的进行有关^[4]。由于不同潮滩湿地间水分条件差异以及硝态氮具有易淋失的特性,所以硝态氮的分布特征比较明显,含量较高区为芦苇和光滩湿地,虽然两者的矿化作用比较弱但是硝化作用较强,所以相对的硝态氮含量高。而不同类型湿地土壤矿化、硝化作用的强弱则可能与湿地土壤质地、植物根际微生物区系组成、数量及其所处生境的水盐状况有密切联系^[5,6]。有关研究表明严重盐碱化可能会抑制氮矿化过程,但需要进一步证实。

3.2 不同类型湿地土壤氮垂直分布特征

图 2 为黄河口滨岸潮滩不同湿地土壤氮素的垂直分布特征。总体来看,各湿地土壤氮均具有明显的垂直分布特征,且大多数湿地表现为表层土壤氮含量大于下层土壤氮含量。由表 3 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素垂直分布变异性可以看出全氮含量

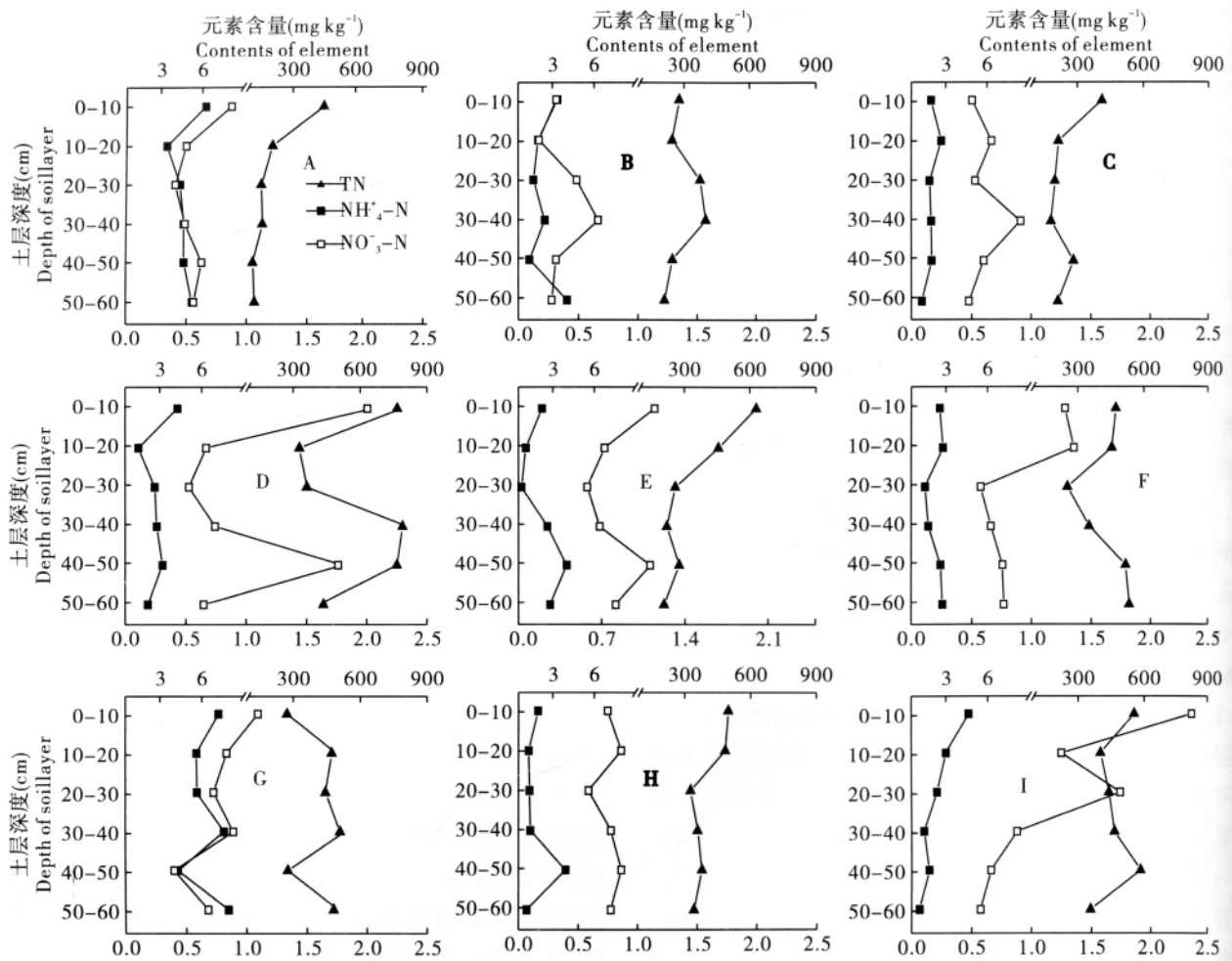


图 2 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮的垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of nitrogen in different wetlands soils in intertidal flat of Yellow River Estuary

垂直变化比较明显为三棱蔗草—朝天委陵菜湿地、芦苇湿地和碱蓬—芦苇湿地, 变异系数都大于 40%。其中, 三棱蔗草—朝天委陵菜湿地、白茅—旱柳湿地和碱蓬—芦苇湿地全氮最大值出现在土壤表层, 假苇拂子茅湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)湿地出现在土壤下层, 芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地和光滩湿地则有两个明显高值分别出现在土壤表层及下层某一深度整体分布呈“S”型。此外, 土壤铵态氮含量的垂直分布变化比较明显, 其中碱蓬—芦苇湿地、碱蓬湿地和光滩湿地垂直变化最大(C.V > 50%), 假苇拂子茅湿地和芦苇湿地次之, 三棱蔗草—朝天委陵菜湿地最小(C.V = 19.42%)(表 3)。除假苇拂子茅湿地、碱蓬—芦苇湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)土壤铵态氮的含量最大值出现在土壤深层外, 其它湿地均出现在土壤表层。而硝态氮含量在假苇拂子茅湿地、芦苇湿地及光滩湿地垂直变化最为明显(C.V > 45%), 在碱蓬—柽柳湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)次之, 在碱蓬湿地则最不明显变异系数仅为 12.83%(表 3)。其中, 三棱蔗

草—朝天委陵菜和碱蓬—柽柳湿地土壤硝态氮含量最大峰值出现在表层, 假苇拂子茅湿地、白茅—旱柳湿地和碱蓬湿地出现在土壤下层某一深度, 而芦苇湿地、碱蓬—芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地(过渡带)和光滩湿地则具有两个明显峰值, 分别位于土壤表层及下层某一深度。

土壤中全氮的含量变化决定于氮素的输入和输出量的相对大小^[7,18]。氮素的输入量主要依赖于植物残体的归还量及生物固氮, 也有少部分来源于大气沉降^[7], 全氮的输出量则主要包括分解和侵蚀损失, 其受各种生物和非生物条件的控制^[9]。三棱蔗草—朝天委陵菜湿地常处于湿润的还原环境, 微生物活动弱, 有机质分解程度低, 所以土壤表层全氮含量很高, 而白茅—旱柳湿地和碱蓬—芦苇湿地则是由于植被盖度、植物残体输入量比较大, 假苇拂子茅湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)湿地处于干湿交替相对较干的氧化环境, 有利于表层有机氮矿化并向下淋滤, 故在土壤深层出现全氮高值; 芦苇湿地和碱蓬—柽柳湿地地表湿润, 植

表 3 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素垂直分布变异性

Table 3 Variability of nitrogen vertical distribution in different wetlands soils in intertidal flat of Yellow River Estuary

湿地类型 Types of wetland	TN			NH ₄ ⁺			NO ₃ ⁻		
	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation
A	202.04	121.10	59.94	4.81	0.93	19.42	0.58	0.16	28.40
B	298.83	76.20	25.50	2.55	1.05	41.41	0.38	0.17	45.39
C	251.21	86.96	34.62	1.96	0.45	22.99	0.62	0.16	25.82
D	583.66	232.37	39.81	2.72	0.96	35.22	1.07	0.67	62.29
E	344.65	167.38	48.56	2.27	1.20	52.97	0.84	0.23	27.65
F	432.03	107.96	24.99	2.35	0.56	23.81	0.90	0.33	36.94
G	420.08	117.17	27.89	6.35	1.41	22.23	0.77	0.23	30.13
H	407.31	73.10	17.95	1.91	1.08	56.71	0.78	0.10	12.83
I	468.64	88.13	18.80	2.41	1.30	53.89	1.25	0.69	55.53

被生物量大,植物残体输入量高,加上植被根系较长,所以全氮含量在表层及深层含量均较高,而光滩湿地则可能与邻近海岸及成土母质相关。湿地土壤铵态氮垂直分布特征的形成是各类型微生物活动、有机氮的矿化以及植物吸收等综合作用的结果,主要受湿地水文条件的影响^[12]。假茅拂子茅湿地、碱蓬—芦苇湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)铵态氮最大值出现在深层一方面可能是由于根际区土壤微生物活性高于非根际区,有利于各种氮形态之间的转化^[20],另一方面也可能与其较好水分条件如干湿交替导致表层淋失至下层累积有关。而硝态氮峰值在湿地土壤表层及深层都有出现,则与 NO₃⁻ 离子不易被带负电荷的土壤粒子固定,较易发生淋失的特性相关^[21],故土壤水分条件和水位高低密切影响土壤硝态氮含量。地表长期过湿或有临时性积水的地带,硝态氮含量峰值仅出现在土壤剖面某一层,而地表较为干旱或短周期干湿交替的地带,土壤剖面中则出现多个峰值。此外,土壤底层硝态氮含量低于表层还可能与植物根系对硝态氮的吸收利用有关^[22]。

3.3 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮与有机质、全磷和全硫之间的相关关系

由表 4 黄河口滨岸潮滩湿地土壤氮与有机质、全磷和全硫之间的相关系数矩阵可以看出全氮与有机氮相关系数达到 1.000($P < 0.01$),呈现了极显著的相关关系,这与上述分析土壤氮素以有机氮为主的结果一致。另外,全氮和有机氮与有机质含量之间也达到了极显著相关($P < 0.01$),但与全磷和全硫之间却没有达到显著相关,这说明土壤氮的变化与有机质的变化紧密联系,Ingersoll 等^[23]也发现湿地全氮含量随有机质的增加而增加。此外,铵态氮与全磷含量在 $P < 0.05$ 水平上显著相关,但与有机质和全硫之间没有达到显著性水平,而硝态氮则与土壤有机质、全磷和全硫之间的相关性均没有达到显著性水平($P > 0.05$)。铵态氮与全磷呈显著相关原因可能是铵态氮主要来自土壤氮的矿化过程,而矿化作用受土壤中全磷有效性的影响^[24]。

表 4 黄河口滨岸潮滩湿地土壤氮与有机质、全磷和全硫之间的相关系数矩阵

表 4 黄河口滨岸潮滩湿地土壤氮与有机质、全磷和全硫之间的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficients matrix between nitrogen and SOM, TP, TS content in different wetlands soils in intertidal flat of Yellow River Estuary

	TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Org- N	SOM	TP	TS
TN	1	-0.278	0.664	1.000**	0.955**	0.492	-0.018
NH ₄ ⁺		1	0.254	-0.290	-0.331	-0.788*	0.162
NO ₃ ⁻			1	0.657	0.528	0.117	0.389
Org- N				1	0.956**	0.501	-0.022
SOM					1	0.598	-0.241
TP						1	-0.239
TS							1

注:表中数据为平均值±标准差及 Duncan 多重比较结果表示,同一列中不同的字母表示在 0.05 水平差异显著。

4 结论

(1)黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮均以有机氮为主,无机氮所占的比例较小且以铵态氮为主。

各湿地土壤氮水平分布特征明显,植被根系分布较深的土壤下层全氮含量一般高于根系分布较浅的,且各土层全氮含量最大值几乎都出现在芦苇湿地,铵态氮含量在各土层变异性很大但最高值几乎都出现在碱

蓬—柽柳湿地(过渡带),硝态氮含量在各土层变异性也比较大,含量较高区则为芦苇湿地和光滩湿地。影响湿地土壤氮水平分布的主要因素有湿地植被类型、生物量、根系长短及水盐等环境条件。

(2)黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮均具有明显的垂直分布特征,且大多数湿地表现为表层土壤氮含量大于下层土壤氮含量。其中,全氮含量垂直变化明显的三棱蔗草—朝天委陵菜湿地、芦苇湿地和碱篷—芦苇湿地($C.V > 40\%$),铵态氮含量垂直变化明显的是碱篷—芦苇湿地、碱蓬湿地和光滩湿地($C.V > 50\%$);硝态氮含量垂直变化明显的是假苇拂子茅湿地、芦苇湿地及光滩湿地($C.V > 45\%$)。影响湿地土壤氮垂直分布的主要因素有植被吸收、根系分布、微生物活动、有机氮矿化及所处水分等环境条件相关。

(3)全氮与有机氮、有机质极显著相关($P < 0.01$),与全磷和全硫没有达到显著相关,铵态氮与全磷含量在 $P < 0.05$ 水平上显著相关,但与有机质和全硫之间没有达到显著性水平($P > 0.05$),硝态氮则与有机质、全磷和全硫之间均没有达到显著性水平($P > 0.05$)。

参考文献:

- [1] MISTCH W J, GOSSELIN J G. Wetlands [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 2000: 89 - 125.
- [2] BRINKLEY D, HART S C. The component of nitrogen availability assessment in forest soil[J]. Advances in Soil Science, 1989, 10: 57 - 112.
- [3] VITOUSEK P M, WHITE P S. Process studies in succession [A]. In: West D C, Shugart H H, Botkin B D (eds). Forest succession: concepts and application [C]. New York: Springer-Verlag, 1981: 267 - 276.
- [4] TILMAN D. The resource- ratio hypothesis of plant succession [J]. American Naturalist, 1985, 125: 827 - 852.
- [5] 李贵才, 韩兴国. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1187 - 1195.
- [6] 侯本栋, 马风云, 邢尚军, 等. 黄河三角洲不同演替阶段湿地群落的土壤和植被特征[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 313 - 318.
- [7] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷, 等. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184 - 193.
- [8] 刘庆生, 刘高焕, 范晓梅, 等. 黄河三角洲土壤盐分剖面类型时空分布研究[J]. 山东农业科学, 2010, 1: 51 - 62.
- [9] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 等. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (10): 2092 - 2097.
- [10] 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. 1999.
- [11] 史作民, 刘世荣, 程瑞梅. 内蒙古鄂尔多斯地区四个植物群落类型的土壤碳氮特征[J]. 林业科学, 2004, 40 (2): 21 - 26.
- [12] BAI J, DENG W, Zhu Y, et al . Spatial variability of nitrogen in soils from land/ inland water ecotones. Commun [J]. Soil Sci. Plant Anal, 2004, 35 (5 - 6): 735 - 750.
- [13] NIKOLAUSZ M, KAPPELMEYER U, SZEKELY A, et al. Diurnal redox fluctuation and microbial activity in the rhizosphere of wetland plants[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44 (3): 324 - 333.
- [14] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 614 - 622.
- [15] 吕艳华, 白洁, 姜艳, 等. 黄河三角洲湿地硝化作用强度及影响因素研究[J]. 海洋湖沼通报, 2008, 2: 61 - 66.
- [16] 孙志高, 刘景双, 王金达, 等. 湿地生态系统土壤氮素矿化过程研究动态[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 155 - 161.
- [17] 李忠佩, 王效举. 小区域水平土壤有机质动态变化的评价与分析 [J]. 地理科学, 2000, 20 (2): 182 - 187.
- [18] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响 [J]. 地理科学, 1998, 18(5): 463 - 471.
- [19] 余晓鹤, 朱培立, 黄东迈. 土壤表层管理对稻田土壤矿化势、固氮强度及铵态氮的影响[J]. 中国农业科学, 1991, 24 (2): 73 - 79.
- [20] 白军红, 丁秋祎, 高海峰, 等. 向海湿地不同植被群落下土壤氮素的分布特征[J]. 地理科学, 2009, 29(3): 381 - 384.
- [21] MITSCH W J, GOSSELIN J G. Wetlands [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 2000, 89 - 125.
- [22] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96 - 101.
- [23] INGERSOLL T L, BAKER L A. Nitrate removal in wetland microcosms[J]. Water Research, 1998, 32 (3): 677 - 684.
- [24] CHEN R H, TWILLEY R R. Patterns of mangrove forest structure and soil nutrient dynamics along the Shark river estuary [J]. Florida Estuaries, 1999, 22(4): 955 - 970.

Spatial Distribution of Nitrogen in Different Wetlands' Soils in Intertidal Flat of Yellow River Estuary

WANG Ling-ling^{1,3}, SUN Zhi-gao^{1*2}, MOU Xiao-jie^{1,3}, SUN Wan-long⁴

(1. Lab of Coastal Wetland Ecology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

4. China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: A comparative study was carried out on soil nitrogen distribution characteristics in different wetlands in the Intertidal Flat of Yellow River Estuary. Results showed soil nitrogen in different wetlands was dominantly composed of organic nitrogen, while inorganic nitrogen content was low and mainly consisted of ammonium nitrogen. Soil nitrogen obviously distributed horizontally, and the contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N were separately higher in Suaeda salsa - Tamatix chinensis Lour wetland (transition zone) and Phragmites australis wetland. The vertical distribution characteristics of soil nitrogen were also obvious, and surface layer was higher than subsoil. The most significantly vertical variation of total nitrogen was in Sparganiaceae- P. supina L wetland, and ammonium nitrogen was in Suaeda salsa (L.) Pall wetland, and nitrate nitrogen was in Phragmites communis Trin wetland. The main factors affecting the spatial distribution of nitrogen were moisture content, plant types and microorganisms. Correlation analysis showed total nitrogen was significantly positively correlated with organic nitrogen and soil organic matter ($P < 0.01$), ammonium nitrogen was negatively correlated with total phosphorus ($P < 0.05$). The research result showed that the distributions of N in wetland soils were affected by plants, and the research could provide theory for the restoration of ecosystem in wetlands.

Key Words: Yellow River estuary; Intertidal flat; Soil nitrogen; Distribution characteristics