

# 黄河三角洲新生湿地不同植物群落下 土壤钙、镁分布特征

孙文广<sup>1,2</sup> 孙志高<sup>2\*</sup> 牟晓杰<sup>2,3,4</sup> 王玲玲<sup>2,4</sup> 孙万龙<sup>2,4</sup> 宋红丽<sup>2,4</sup> 姜欢欢<sup>2,4</sup>

(1. 中国农业大学(烟台)理工学院, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要** 以黄河三角洲新生湿地为研究对象, 对不同植物群落下湿地土壤 Ca、Mg 含量的分布特征进行了对比研究。结果表明, 不同类型湿地土壤中 Ca、Mg 含量沿群落演替方向呈波动变化, 其水平变异性较大, 所有土层均为中等变异 ( $C.V > 10\%$ ) 但 Ca 的变异性明显大于 Mg。Ca 的垂直变异性较大, 大部分采样点的变异系数在 10% 以上, 属中等变异。影响土壤 Ca 含量分布的主要因素有成土母质风化迁移以及垂直淋失。比较而言, 不同类型湿地土壤中 Mg 的垂直分布差异不大, 其主要受制于湿地土壤水盐条件和成土母质。相关分析表明, 土壤中的 Ca、Mg 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ) 但二者与有机质、全氮、全磷和全硫之间的相关性均未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。研究发现, 植被对调整湿地 Ca、Mg 的空间分布具有显著影响, 从而为湿地 Ca、Mg 的生物地球化学过程研究提供了相关理论依据。

**关键词** 黄河三角洲 新生湿地 Ca Mg 分布特征

中图分类号 S153.6 文献标识码:A 文章编号 0564-3945(2013)03-0628-07

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, 湿地土壤养分含量变化受生态系统的水文过程、植被类型、土壤理化性质等多种因素的影响。Ca、Mg 不仅是土壤中的重要中量营养元素, 而且又是土壤的主要盐基元素, 其对于土壤的酸碱状况和养分状况等具有深刻影响<sup>[1]</sup>。湿地土壤 Ca 和 Mg 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, 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<sup>[2-4]</sup>。不同类型湿地土壤营养状况的差异影响着植被群落的形成过程, 同样湿地植被群落的变化也影响着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。国外关于湿地营养元素的开展较早且广泛<sup>[5,6]</sup>, 但是, 目前对中量营养元素 Ca 和 Mg 的研究还较少<sup>[7,8]</sup>, 从国内来看, 已对该区域的景观格局<sup>[9,10]</sup>、开发利用与保护<sup>[11-14]</sup>、生态环境影响<sup>[15-18]</sup>、群落演替与变化<sup>[19-23]</sup>及生态修复<sup>[24,25]</sup>等方面进行了一定的研究, 但对于黄河口新生湿地不同植物群落下土壤营养元素含量及分布特征的对比研究还不多见<sup>[26-28]</sup>, 而对于中量营养元素 Ca 和 Mg 的研究还未见

报道。鉴于此, 本文以黄河三角洲新生湿地不同植物群落下的土壤为研究对象, 通过对不同类型湿地土壤 Ca、Mg 含量空间分布规律的对比研究, 旨在揭示湿地土壤 Ca、Mg 分布特征与植被类型之间的相互关系。研究结果不仅可为黄河三角洲湿地土壤养分循环研究提供基础数据, 并且还可为该区湿地生态系统的恢复与保育提供科学依据。

## 1 研究区域

试验区位于山东省黄河三角洲国家级自然保护区 ( $37^{\circ}40' \sim 38^{\circ}10' N, 118^{\circ}41' \sim 119^{\circ}16' E$ ) 今黄河入海口北部的滨岸潮滩湿地。该区属暖温带季风气候区, 四季分明, 冷热干湿界限极明显, 年平均气温  $12.1^{\circ}C$ , 无霜期 196 d,  $\geq 10^{\circ}C$  的积温约  $4300^{\circ}C$ , 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(淡色潮湿雏形土)和盐土(潮湿正常盐成土), 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, 大面积的土地因次生盐渍化而向重盐碱荒地和光板地生态系统方向演替, 使系统的正向演替过程受到干扰<sup>[23]</sup>。区域内地势平坦, 自然坡降  $1/8000 \sim 1/12000$ , 生态格局时空变化迥异, 湿地类型多样, 植被以草甸为主, 林

收稿日期 2011-04-07, 修订日期 2011-05-09

基金项目 山东省自然科学基金重点项目(ZR2010DZ001)、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)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05030404-2)资助

作者简介 孙文广(1989-), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事湿地生物地球化学研究。E-mail: swg1108@126.com

\* 通讯作者 E-mail: zgsun@yic.ac.cn

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(A)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*) 群落(B)、白茅—旱柳(*Imperata cylindrica*—*Salix matsudana*) 群落(C)、芦苇(*Phragmites australis*) 群落(D)、碱蓬—芦苇(*Suaeda salsa*—*Phragmites australis*) 群落(E)、碱蓬—柽柳(*Suaeda salsa*—*Tamatis chinensis*) 群落(F)、碱蓬—柽柳(*Suaeda salsa*—*Tamatis chinensis*) 群落(过渡带,G)和碱蓬(*Suaeda salsa*) 群落(H)和光滩(I)。演替方向自 I 群落向 A 群落进行,即自海向陆生态系统依次由滩涂湿地生态系统, 经由新淤地生态系

统、重盐碱地生态系统向低盐分生态系统方向演替。

## 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,在今黄河入海口北部选择未受人类活动扰动的滨岸潮滩为研究对象,按照湿地植物群落类型布设 9 个采样点(表 1)。采样时,分别在每个典型样区内采集 3 个土壤剖面,剖面深度为 60 cm,每 10 cm 一层,然后对 3 个剖面样品进行等层次混合,共采集土壤样品 54 个。

表 1 采样点地理位置

Table 1 Geographical location of sampling sites

样点 Sampling sites	地理位置 Geographical location	样点 Sampling sites	地理位置 Geographical location
A 三棱蔗草—朝天委陵菜湿地	37°45' 48.3" N, 119°09'45.0" E	F 碱蓬—柽柳湿地	37°45' 57.0" N, 119°09'40.7" E
B 假苇拂子茅湿地	37°45' 49.3" N, 119°09'44.6" E	G 碱蓬—柽柳湿地(过渡带)	37°46' 35.8" N, 119°09'36.0" E
C 白茅—旱柳湿地	37°45' 50.3" N, 119°09'43.4" E	H 碱蓬湿地	37°46' 38.9" N, 119°09'41.4" E
D 芦苇湿地	37°45' 51.5" N, 119°09'42.9" E	I 光滩	37°46' 41.1" N, 119°09'41.3" E
E 碱蓬—芦苇湿地	37°45' 53.6" N, 119°09'42.0" 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钙(Ca)、镁(Mg)、全氮(TN)、全磷(TP)、全硫(TS)及有机质(SOM)含量等。其中,钙、镁含量采用原子吸收分光光度法,全氮含量采用凯氏法测定,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<sup>[29]</sup>。

### 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。

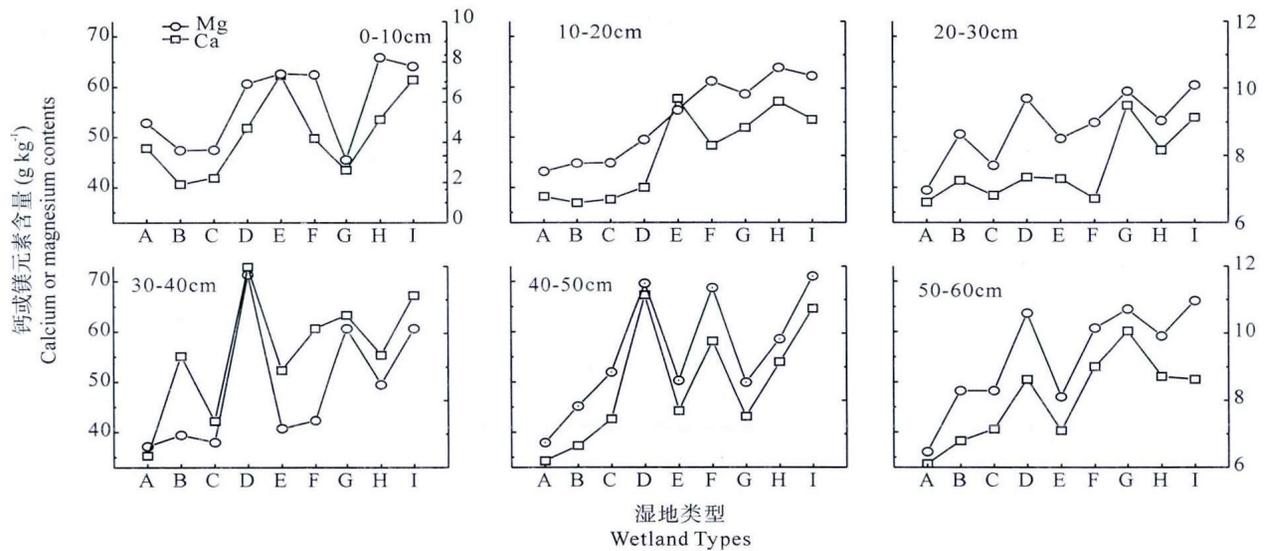
## 3 结果与分析

### 3.1 湿地土壤 Ca、Mg 含量水平分布特征

黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤 Ca、Mg 的水平分布如图 1 所示。据图 1 可知,黄河口滨岸潮滩不同类型湿地 Ca、Mg 含量在水平方向的变化规律具有一定的相似性。各土层 Ca、Mg 含量最低值基本上均出现在三棱蔗草—朝天委陵菜湿地,这可能与三棱蔗草—朝天委陵菜湿地的成土母质有关。具体而言,0 ~ 10 cm 土层的 Ca 含量分布整体呈“W”型,最高值出现在碱蓬—芦苇湿地(62.305 g kg<sup>-1</sup>),最低值出现在假苇拂子茅湿地,仅为 40.686 g kg<sup>-1</sup>。10 ~ 20 cm 土层的 Ca 含量自三棱蔗草—朝天委陵菜湿地到光滩呈缓慢增大

趋势,但在碱蓬—柽柳湿地和光滩略有降低,20 ~ 30 cm 土层 Ca 含量自三棱蔗草—朝天委陵菜湿地到碱蓬—柽柳湿地变化不大,范围为 37.02 ~ 42.03 g kg<sup>-1</sup>,但在碱蓬—柽柳湿地(过渡带) Ca 含量骤然增加,高达 56.28 g kg<sup>-1</sup>。30 ~ 40 cm 和 40 ~ 50 cm 土层 Ca 含量水平分布呈波动变化,范围分别为 37.171 ~ 71.346 g kg<sup>-1</sup>和 34.306 ~ 67.293 g kg<sup>-1</sup>,且最高值均出现在芦苇湿地,而在 50 ~ 60 cm 土层, Ca 含量整体呈“M”型,其在碱蓬—柽柳湿地和碱蓬—柽柳湿地(过渡带)的含量较高。不同演替时期土壤中各元素的平均含量变化可反映其在水平方向上的变异性。按 Cambardella 等对变异系数的分级标准: C<sub>v</sub> < 10% 属于弱变异性, C<sub>v</sub> = 10% ~ 100% 属于中等变异性, C<sub>v</sub> > 100% 属于强变异性。由表 2 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤 Ca 含量水平分布的变异性可知, Ca 含量在不同类型湿地各土层中均属于中等变异性,变异系数在 15.49% ~ 25.44% 之间,且 Ca 含量在土壤表层差异不大,但深层要高于表层(表 2)。不同类型湿地土壤 Ca 含量呈明显的波动变化,且变异系数较大,这一方面可能是由于 Ca 发生了风化迁移和聚积,另一方面可能受土壤类型、气候条件、区域植物的生产力水平以及枯落物分解程度的影响。

就 Mg 而言,10 ~ 20 cm 土层的 Mg 含量自三棱蔗草—朝天委陵菜湿地到光滩呈缓慢增大趋势,但在碱蓬—柽柳湿地(过渡带)和光滩略有降低,0 ~ 10 cm、20 ~ 30 cm 土层中 Mg 含量的水平分布呈波动变化,



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 不同类型湿地土壤 Ca、Mg 的水平分布特征

Fig. 1 Horizontal distribution characteristics of calcium and magnesium in different wetlands soils

表 2 不同类型湿地土壤 Ca、Mg 水平分布变异性

Table 2 Variability of calcium and magnesium horizontal distribution in different wetlands soils

不同土层 Different soil layer	Ca			Mg		
	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation
0 ~ 10 cm	50.37	7.80	15.49	9.51	1.17	12.30
10 ~ 20 cm	46.79	8.64	18.47	9.11	1.23	13.50
20 ~ 30 cm	44.00	7.02	15.95	8.84	1.03	11.65
30 ~ 40 cm	48.86	12.43	25.44	9.46	1.77	18.71
40 ~ 50 cm	49.52	11.90	24.03	9.43	1.77	18.77
50 ~ 60 cm	46.66	8.54	18.30	9.28	1.55	16.70

但变异系数较小,含量较高的有碱蓬湿地(过渡带)和光滩。30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm、50 ~ 60 cm 土层 Mg 含量的水平分布差异较大,且最高值分别出现在芦苇湿地和光滩湿地。据表 2 亦可知, Mg 含量在不同类型湿地各土层中也均属于中等变异性,变异系数在 11.65% ~ 18.77% 之间,但是 Mg 含量变异性均明显小于 Ca 含量。其中, 30 ~ 60 cm 各土层 Mg 含量的变异性显著大于 0 ~ 30 cm 各土层。导致 Mg 含量变异性均明显小于 Ca 含量这一现象的原因可能一方面与湿地的水分条件密切相关,因为水分状况显著影响湿地对 Ca 的持留能力,潮滩湿地常处于滞水或饱和状态,湿地中的有机物分解产生还原性物质,而在还原环境中, Mg 的活性增强,发生了垂直淋失、迁移和淀积。

### 3.2 湿地土壤 Ca、Mg 含量垂直分布特征

图 2 为不同类型湿地土壤 Ca 和 Mg 的垂直分布特征。从图 2 可知,不同湿地土壤中 Ca、Mg 的垂直分布既具有一定的相似性又存在一定差异性。总体来看,

各湿地土壤 Ca、Mg 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 Ca、Mg 含量大于下层土壤。就 Ca 含量而言,在所研究的九种湿地类型中,三棱蔗草—朝天委陵菜湿地和碱蓬—芦苇湿地 Ca 含量的垂直分布特征较为相似,整体自上而下逐渐降低,且均在 30 ~ 40 cm 土层中略有增加。假苇拂子茅湿地和白茅—旱柳湿地 Ca 含量的垂直分布特征在整体上较为相似,均呈“W”型波动变化,但峰值出现的土壤深度不同,假苇拂子茅湿地出现在 20 ~ 30 cm 土层,而白茅—旱柳湿地出现在 0 ~ 10 cm。芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地和光滩土壤 Ca 含量的垂直分布特征较为相似,均呈“S”型分布,但最大值所出现的土层不同,芦苇湿地出现在 30 ~ 40 cm 土层,而碱蓬—柽柳湿地和光滩出现在 40 ~ 50 cm 土层,碱蓬—柽柳湿地(过渡带)土壤 Ca 含量的整体分布与芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地和光滩恰好相反,呈倒“S”型分布,且峰值出现的深度与芦苇湿地相同,均在 30 ~ 40 cm 土层。碱蓬湿地

土壤 Ca 含量整体呈“M”型分布,其在土壤表层及 40 ~ 50 cm 土层存在两个明显高值。土壤中的 Ca 含量变化主要取决于 Ca 的输入和输出量的相对大小。Ca 的输入量主要依赖于 Ca 的风化迁入、聚积以及植物残体归还。而 Ca 的输出量主要包括风化迁出,侵蚀损失以及植物的吸收,其主要受非生物条件的控制。Ca 含量

如上分布的原因可能主要与成土母质 Ca 的风化迁移与聚积有关<sup>[30]</sup>。此外,不同类型湿地土壤中 Ca 含量垂直分布特征的差异还可能与土壤水分条件差异、微生物活动强弱、不同植物生产力高低以及不同枯落物分解难易程度等因素有关。

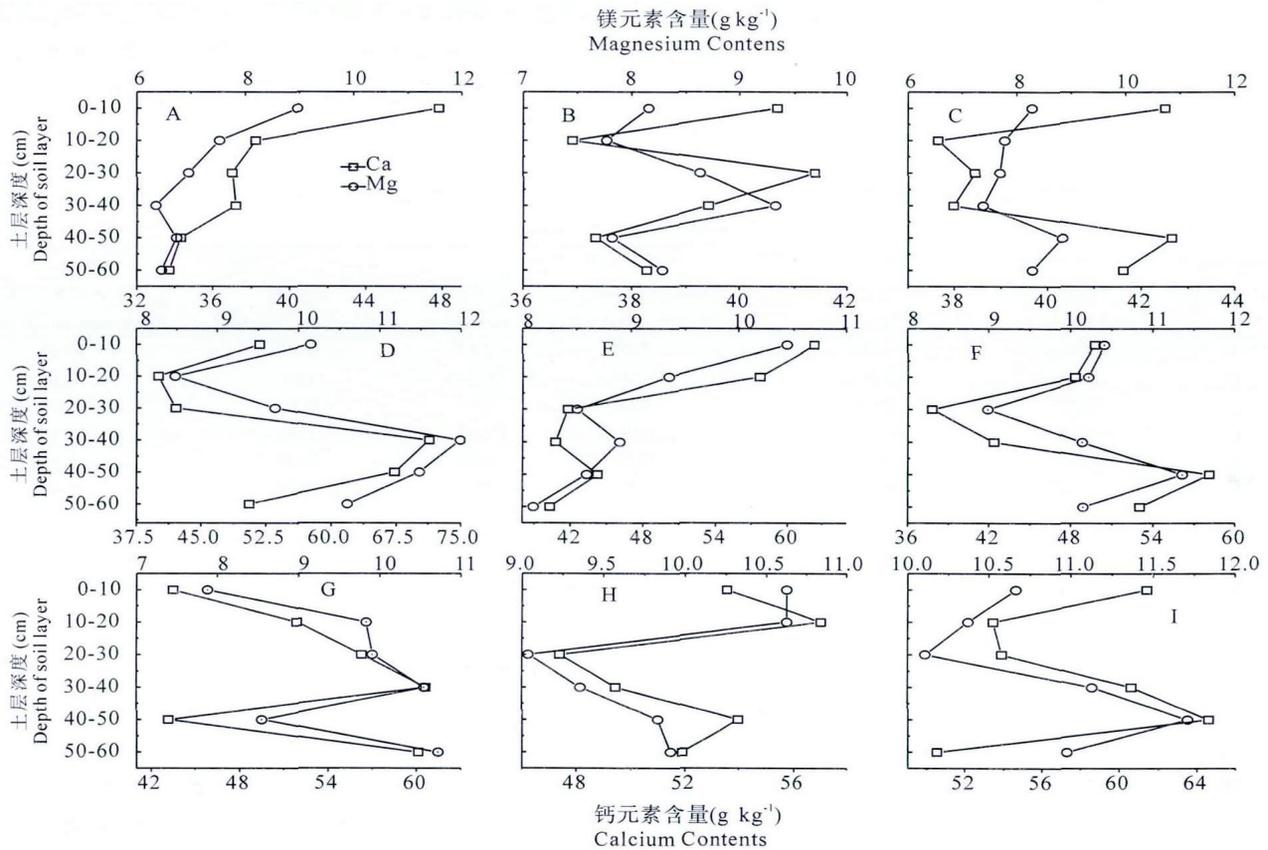


图 2 不同类型湿地土壤 Ca 和 Mg 的垂直分布特征  
Fig. 2 Vertical distribution characteristics of calcium and magnesium in different wetland soils

不同湿地土壤中 Mg 含量的垂直分布特征也较为明显。三棱蔗草—朝天委陵菜湿地、白茅—旱柳湿地和碱蓬—芦苇湿地土壤中 Mg 含量的垂直分布特征较为相似,整体呈降低趋势。三棱蔗草—朝天委陵菜湿地和芦苇—碱蓬湿地 Mg 含量的波动程度在上层较大,而白茅—旱柳湿地的波动程度较低。假苇拂子茅湿地土壤 Mg 含量呈单峰波动变化,且峰值出现在 30 ~ 40 cm 土层。芦苇湿地、碱蓬—柽柳湿地和光滩土壤 Mg 含量的垂直分布特征较为相似,均呈“S”型分布,但最大值出现的土壤深度不同,芦苇湿地出现在 30 ~ 40 cm 土层,而碱蓬—柽柳湿地和光滩出现在 40 ~ 50 cm 土层。碱蓬—柽柳湿地(过渡带)和碱蓬湿地土壤的 Mg 含量整体呈降低趋势,不同的是,碱蓬—柽柳湿地(过渡带)在 30 ~ 50 cm 土层中出现较大波动,而碱蓬湿地在 10 ~ 30 cm 土层中出现较大波动。一般而言,Mg

含量垂直分布特征的差异主要受制于植物的选择性吸收和所处的土壤水环境。有关研究表明,不同植被覆盖下的湿地土壤,由于植物的选择性吸收,Mg 元素易在表层发生富集。另外,长期处于渍水状态下湿地土壤中的有机物易分解产生还原性物质,而在还原环境下 Mg 的活性增加,容易发生向下的迁移与淀积<sup>[31]</sup>。此外,不同湿地土壤中 Ca、Mg 的垂直分布也具有一定的相似性,其原因除了与成土母质有关外,还可能与 Ca 聚积的同时也伴随着 Mg 的溶解、迁移和沉淀有关。不同类型湿地土壤中 Ca、Mg 含量垂直分布特征的差异还与不同环境土壤水分条件差异及其引起的不同质地土层 Ca、Mg 的垂直淋失有关。研究时段内,光滩地表多积水或淹水,水分条件较好,Ca 和 Mg 可随水分垂直淋失至较深土层中,进而使得其在土壤剖面中的波动变化明显。但随植被群落的演替,水分条件产生变化,元素在

土壤中垂直淋失的程度不同,表现出不同的波动变化。当然,不同湿地土壤中Ca和Mg含量分布特征的差异还与植物吸收、矿化、生物固持等过程进行程度的差异有关,其垂直变化是诸因素综合作用的结果<sup>[32]</sup>。

据表3不同类型湿地土壤Ca和Mg垂直分布变异性可知,Ca含量在演替初期(光滩无植被)较高,但沿着演替方向呈减小趋势,直到演替末期(三棱蔗草-朝天委陵菜湿地),其含量达到最低,变异系数较大。光滩土壤Ca含量高的原因可能与黄河携带的悬浮泥沙在光滩发生CaCO<sub>3</sub>沉降作用有关<sup>[33]</sup>。Mg含量在演替初期(光

滩无植被)较高,但自碱蓬湿地开始,Mg含量沿着演替方向整体较高,但百日茅第一旱柳湿地原则呈降低趋势。之后,Mg含量在演替末期呈降低趋势,且变异系数较小。黄河口滨岸潮滩土壤中的Ca含量与黄土高原土壤的Ca含量相差不大,是全国土壤平均Ca含量的三倍。而Mg含量比全国土壤平均Mg含量稍高,但比黄土高原土壤的Mg含量略低<sup>[30]</sup>。这可能与黄河口滨岸潮滩土壤大多来源于黄土高原土壤,而该土壤的成土母质与全国其它地方土壤的成土母质明显不同有关。

表3 不同类型湿地土壤Ca和Mg垂直分布变异性

Table 3 Variability of calcium and magnesium vertical distribution in different wetlands soils

湿地类型 Wetland type	Ca			Mg		
	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation
A	38.01	5.10	13.42	7.17	0.98	13.67
B	39.33	2.07	5.26	8.33	0.58	6.96
C	39.95	2.06	5.26	8.03	0.52	6.48
D	48.95	10.22	20.88	10.40	1.26	12.11
E	48.01	9.48	19.75	8.98	0.83	9.24
F	47.47	8.23	17.34	10.21	0.76	7.44
G	51.86	7.12	13.73	9.57	1.13	11.81
H	51.74	3.86	7.46	9.95	0.72	7.24
I	56.30	5.44	9.66	10.83	0.57	5.26

由表3亦可知,不同类型湿地土壤Ca含量的垂直变异性相对较大,大部分湿地土壤均属于中等变异性,特别是芦苇湿地(20.88%),碱蓬-碱蓬湿地(19.75%),碱蓬-柽柳湿地(17.34.%)变异系数均在20%左右,变异性较高。较高的垂直变异性主要与上层土壤和下层土壤影响Ca含量分布的主导因素差异有关,上层土壤中Ca含量可能受外界环境条件、植物根系、水分条件以及化学过程等影响较为显著,且可能受土壤盐分条件影响,这主要是由于Ca是土壤中主要的盐基元素,但是影响可能较小;而下层土壤可能受土体结构、性质以及成土母质基础的影响较大。比较而言,沿着植物群落演替的方向,Mg在垂直方向上的变化规律并不明显,变异程度除三棱蔗草-朝天委陵菜湿地(13.67%),芦苇湿地(12.11%)和碱蓬-柽柳湿地(11.81%)属中等变异外,其它群落中均为弱变异性(<10%),这可能一方面与土壤中Mg含量主要与成土母质有关,另一方面可能与土壤盐分状况有关,这是因为土壤盐分变化能够显著影响湿地演替方向植被群落变化,而Mg是土壤中主要的盐基元素,又因为湿地土壤中Mg含量与植物选择吸收有关,所以土壤盐分状况可以间接影响湿地Mg含量变化,并且土壤盐分对于Mg含量的影响要显著大于对Ca含量的影响<sup>[34,35]</sup>。

### 3.3 湿地土壤Ca、Mg含量与其它元素含量的相关关系

由表4可知,黄河口滨岸潮滩湿地Ca与Mg的相关系数达到0.888,呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),这与上述分析得到的Ca聚积的同时可能也伴随着Mg的溶解、迁移与沉淀有关以及Ca、Mg的垂直分布均与成土母质有关的推论相一致。不同的是,Ca、Mg与土壤有机质、全氮、全磷和全硫之间的相关性均未达到显著水平( $P > 0.05$ ),说明土壤Ca、Mg的变化与有机质和土壤主要营养元素(氮、磷、硫)可能无非常紧密联系,这与前人研究得到的温室土壤中Ca含量与有机质显著相关的结论相悖<sup>[36]</sup>,这可能是由于黄河口滨岸潮滩湿地

表4 湿地土壤Ca、Mg含量与其他元素含量(SOM、TN、TP、TS)之间的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficients matrix among calcium or magnesium contents and other element contents (SOM, TN, TP, TS) in different wetland soils

	Ca	Mg	TN	TP	TS	SOM
Ca	1	0.888**	0.024	-0.033	-0.06	0.088
Mg		1	0.050	-0.047	-0.034	0.072
TN			1	0.074	-0.018	0.929**
TP				1	-0.239	0.080
TS					1	0.512
SOM						1

注:\*\* 显著性水平  $P < 0.01$ 。

土壤的 Ca 含量主要与成土母质有关, 且有机质含量变化小有关, 而日光温室中的土壤有机质含量变化明显, Ca 主要来自肥料的供给<sup>[37]</sup>。

## 4 结论

(1) 不同类型湿地土壤中 Ca、Mg 含量沿群落演替方向呈波动变化, 其水平变异性较大, 所有土层均为中等变异 ( $C.V > 10\%$ ), 但 Ca 的水平变异性明显大于 Mg。

(2) Ca 的垂直变异性较大, 大部分采样点的变异系数在 10% 以上, 属中等变异。影响土壤 Ca 含量分布的主要因素有成土母质、风化迁移以及垂直淋失。不同类型湿地土壤中 Mg 的垂直分布差异不大, 其主要受制于湿地土壤水分条件和成土母质。

(3) 土壤中的 Ca、Mg 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 但二者与有机质、全氮、全磷和全硫之间的相关性均未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。

## 参考文献:

- [1] 蒲玉琳, 张宗锦, 刘世全, 等. 西藏土壤钙镁钾钠的迁移和聚集特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 86 - 90.
- [2] 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.
- [3] TILMAN D. The resource- ratio hypothesis of plant succession [J]. American Naturalist, 1985, 125: 827 - 852.
- [4] H. OLDE VENTERINK, T.E. DAVIDSSONL, K. KIEHL, et al. Impact of drying and rewetting on N, P and K dynamics in a wetland soil [J]. Plant and Soil, 2002, 243: 119 - 130.
- [5] SWARUP A. Iron, Zinc and Manganese Nutrition of Wetland Rice (Oryza - Sativa L) on a Gypsum Amended Sodic Soil [J]. Plant and Soil, 1993, 156: 477 - 480.
- [6] KVETJ, POKOMY. J. Carbon accumulation by macrophytes of aquatic and wetland habitats with standing water [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences India Section Biological Sciences, 2008, 78: 91 - 98.
- [7] W. F. DEBUSK, K. R. REDDY, M. S. KOCH, et al. Spatial Distribution of Soil Nutrients in a Northern Everglades Marsh: Water Conservation Area 2A [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1994, 58: 543 - 552.
- [8] F.S. GILLIAM, J.D. MAY, M.A. FISHER, et al. Short-term changes in soil nutrients during wetland creation [J]. Wetlands Ecology and Management, 1999, 6: 203 - 208.
- [9] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 黄河三角洲土地利用覆盖格局与演化分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 158 - 161.
- [10] 张建锋, 邢尚军, 孙启祥, 等. 黄河三角洲植被资源及其特征分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 100 - 102.
- [11] 张晓龙, 李培英, 刘月良, 等. 黄河三角洲湿地研究进展 [J]. 海洋科学, 2007, 31(7): 81 - 85.
- [12] 王玉珍. 黄河三角洲湿地资源及生物多样性研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6): 1745 - 1746, 1787.
- [13] 李政海, 王海梅, 刘书润, 等. 黄河三角洲生物多样性分析 [J]. 生态环境, 2006, 15(3): 577 - 582.
- [14] 刘红玉, 吕宪国, 刘振乾. 环渤海三角洲湿地资源研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 102 - 104.
- [15] 许学工, 林辉平, 付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 111 - 118.
- [16] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 606 - 613.
- [17] 武洪涛, 张震宇, 常宗广. 小浪底工程对黄河下游湿地生态环境影响预测[J]. 国土与自然资源研究, 2001 (3): 54 - 55.
- [18] 袁祖贵, 楚泽涵, 杨玉珍. 黄河入海口径流量和输沙量对黄河三角洲生态环境的影响[J]. 古地理学报, 2006, 8(1): 126 - 130.
- [19] 丁秋祚, 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.
- [20] 叶庆华, 田国良, 刘高焕, 等. 黄河三角洲新生湿地土地覆被演替图谱[J]. 地理研究, 2004 23(2): 257 - 264.
- [21] 尹延鸿, 周永青, 丁 东. 现代黄河三角洲海岸演化研究 [J]. 海洋通报, 2004, 23 (2): 32 - 40.
- [22] 张绪良, 叶思源, 印 萍, 等. 黄河三角洲自然湿地植被的特征及演化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 292 - 298.
- [23] 郝金标, 宋玉民, 邢尚军, 等. 黄河三角洲生态系统特征与演替规律[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 111 - 114.
- [24] 房 用, 慕宗昭, 孟振农. 黄河三角洲湿地生态系统保育及恢复技术研究展望[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 183 - 185.
- [25] 邢尚军, 张建锋, 宋玉民, 等. 黄河三角洲湿地的生态功能及生态修复[J]. 山东林业科技, 2005 (2): 69 - 71.
- [26] 孙万龙, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征 [J]水土保持通报, 2010, 30(4): 1 - 6.
- [27] 陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 等. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 69 - 73.
- [28] 孙宁波, 王宇庭, 孙春光, 等. 黄河三角洲水库底泥中氮、磷特征及其与水体磷富营养化关系[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 274 - 278.
- [29] 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.
- [30] 田均良, 刘普灵, 李雅琦. 黄土高原土壤剖面元素相对迁移强度初探[J]. 水土保持研究, 1995, 2(4): 51 - 55.
- [31] 于家宝, 王金达, 刘景双. 三江平原泥炭中营养元素垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 265 - 268.
- [32] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶樟湿地土壤氮的垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1342 - 1347.
- [33] 张向上. 黄河口碳运输过程及其对莱州湾的影响[D]. 中国海洋大学研究生学位论文.
- [34] 伊传华, 田长彦, 张福锁, 等. 新疆三种类型盐生植物矿质元素含量的特点比较[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 42 - 44.
- [35] 马小伟, 胡 东, 华振铃, 等. 土壤水分、盐分对野鸭湖湿地植物群落演替的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 50 - 54.
- [36] 张大庚, 李天来, 依艳丽, 等. 沈阳市郊温室土壤钙素特征的初步研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 200 - 203, 212.
- [37] 赵庚星, 李秀娟, 李 涛, 等. 耕地不同利用方式下土壤养分状况分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 55 - 58.

## Spatial Distribution of Calcium and Magnesium in Different Plant Communities in New-born Wetland of Yellow River Estuary

SUN Wen-guang<sup>1,2</sup>, SUN Zhi-gao<sup>2\*</sup>, MOU Xiao-jie<sup>2,3,4</sup>, WANG Ling-ling<sup>2,3</sup>, SUN Wan-long<sup>2,3</sup>,  
SONG Hong-li<sup>2,3</sup>, JIANG Huan-huan<sup>2,3</sup>

(1.China Agricultural University, Yantai 264670; 2.Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003 Shandong, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing,100039, China; 4.Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China.)

**Abstract:** In August 2008, the new-born wetlands in Yellow River Delta, covered with different plants communities, were selected to study the spatial distribution characteristics of calcium (Ca) and magnesium (Mg) in wetland soils. Results showed that calcium (Ca) and magnesium (Mg) contents in different wetland soils fluctuated significantly with the succession, but the variation level was large and all soil layers presented medium variation (C.V>10%). In general, the variability of calcium was greater than that of magnesium. On the other hand, the vertical distribution characteristics of Ca and Mg in different wetlands soils were very significant. For the most, the Ca contents presented medium variation and the main affecting factors were related to soil parent material, weathering migration and vertical leaching. Comparatively, the vertical distribution of Mg had little variation, which was mainly influenced by soil water or salinity conditions and soil parent material. Further analysis showed that Ca was significantly positively correlated with Mg ( $P<0.01$ ), but neither of them significantly correlated with soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total sulfur ( $P<0.05$ ). The study found that the space distributions of Ca and Mg in wetland soils were affected by plants significantly, then the study could provide a relevant theoretical basis for biogeochemical process of Ca and Mg in wetlands.

**Key words:** Yellow River estuary, New-born wetland; Calcium; Magnesium; Distribution characteristics