

# 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征

孙万龙<sup>1,2</sup>, 孙志高<sup>2,3</sup>, 牟晓杰<sup>2,4</sup>, 王玲玲<sup>2,4</sup>

(1. 中国农业大学(烟台)理工学院, 山东 烟台 264670; 2. 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; 3. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以黄河口滨岸潮滩湿地为研究对象, 研究了不同植被群落覆盖下湿地土壤中磷、硫的变化特征及其储量状况。结果表明, 植被群落的变化能够影响土壤中磷、硫的含量, 但影响程度不同。沿植物群落演替方向, 土壤全磷含量差异不显著, 变异系数较小, 而全硫含量受影响显著, 呈“S”型波动变化; 在垂直分布特征方面, 全磷的差异程度不大, 表明土壤中磷含量主要取决于成土母质, 相对而言, 硫的垂直分布特征存在较大差异, 大部分采样点的变异系数在 10% 以上, 属中等变异, 其分布特征主要受制于土壤有机质的分布; 两种元素的储量及其分布状况受植被群落的影响程度不同, 不同植被群落土壤的磷储量及其分布状况差异不大, 均在  $0.32 \text{ kg/m}^2$  (0—60 cm) 附近波动; 而不同土壤中硫储量存在较大差异, 沿演替方向呈“S”型波动变化, 最高值  $0.33 \text{ kg/m}^2$  (光滩, 0—60 cm), 最低值  $0.17 \text{ kg/m}^2$  (演替末期, 0—60 cm), 但其分布状况差异不大。研究结果表明, 植被对调整湿地磷、硫的空间分布具有显著影响, 故可根据生源元素的循环选择适宜的植物对湿地进行生态修复, 为湿地生态的修复提供理论依据。

**关键词:** 群落演替; 磷; 硫; 分布特征; 湿地土壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0104-05

中图分类号: X144, S152

## Distribution Characteristics of Phosphorus and Sulfur in Different Wetland Soils of the Yellow River Delta

SUN Wan-long<sup>1,2</sup>, SUN Zhi-gao<sup>2,3</sup>, MOU Xiao-jie<sup>2,4</sup>, WANG Ling-ling<sup>2,4</sup>

(1. Institute of Technology, China Agricultural University(Yantai), Yantai, Shandong 264670, China; 2. Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences Yantai, Shandong 264003, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen, Fujian 361005, China; 4. Graduate University of the Chinese Academy Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In August, 2008, the wetlands in the Yellow River Delta, covered with different plant communities, were selected as the study objects to investigate the spatial distribution characteristics and the reserves of phosphorus(P) and sulfur(S) in wetland soils. Results showed that different plant communities could affect the contents of P and S differently. Total phosphorus(TP) content had no significant variation with the succession, while total sulfur(TS) content, varying in the “S” mode, was affected obviously by the period of plant community succession. As for the characteristics of vertical distribution, TP content was not remarkable, showing that TP in soils depends on parent material. However, the vertical distribution of TS was significant ( $C_v > 10\%$ ) and its distribution was based on soil organic matter. Besides, the reserves and distributions of the two elements were also affected by plant communities differently. Both the reserve and the distribution of phosphorus varied little, fluctuating around  $0.32 \text{ kg/m}^2$  (0—60 cm). The reserve of S varied significantly from  $0.17 \text{ kg/m}^2$  (the last stage of succession, 0—60 cm) to  $0.33 \text{ kg/m}^2$  (bare beach, 0—60 cm), fluctuating in “S” mode with the succession, while the distribution of S was not clear. Result from the research shows that the distributions of P and S in wetland soils

收稿日期: 2010-03-22

修回日期: 2010-04-14

资助项目: 国家海洋局近岸海域生态环境实验室基金(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); 中国科学院院长奖获得者科研启动基金(AJ0809BX-036); 中国科学院烟台海岸带所前沿领域项目(HJ0810BX-047)

作者简介: 孙万龙(1988—), 男(汉族), 山东省日照市人, 研培生, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: yinruore@126.com.

通信作者: 孙志高(1979—), 男(汉族), 山东省莱阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: zgsun@yic.an.cn.

are affected by plants and thus, right plants can be selected to apply in ecological rehabilitation of wetland. The research may provide a theoretical basis for the ecological rehabilitation of wetlands.

**Keywords:** community succession; phosphor; sulfur; distribution characteristic; wetland soil

土壤是植物的营养库之一,植物从土壤中获得大部分营养物质来满足其生存需要,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。湿地土壤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湿地土壤空间上养分的分布差异。湿地土壤磷(P)和硫(S)等元素的时空分布特征不仅能反映湿地土壤结构状况和可利用水平,而且会影响湿地植被生长,关系到湿地环境的形成和植被演替过程<sup>[3]</sup>。

黄河三角洲国家级自然保护区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,国内对该区域湿地土壤营养元素的分布规律已经有了一定的研究,但多数集中在单一湿地类型中营养元素在土壤中的空间分布特征<sup>[4]</sup>,研究多关注于单一植物群落的几个样地,而对自然状态下不同植被群落下湿地土壤营养元素含量变化特征的研究尚少。为此,本研究对不同植被群落下湿地土壤P和S的垂直分布规律进行了探讨,旨在揭示不同植被群落下湿地土壤P和S元素的垂直分布规律,突破了以往研究中的单一性和局限性,可为黄河三角洲湿地土壤养分循环研究提供基础数据,为湿地生态系统的恢复、保护和管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究样地位于黄河三角洲腹地的典型湿地分布区,属于温带大陆性季风气候,年平均气温 12.3 °C;年平均降水量 555.9 mm,多集中在7—8月份;年蒸发量 1 962.1 mm,是降水量的 3.6 倍。该区域土壤形成时间相对较短,机械组成以粉沙为主,沙黏层次变化复杂。土壤质地以轻壤土和中壤土为主,土壤类型以潮土和盐土为主。研究区淡水缺乏,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,湿地植被群落演替频繁,且逆向演替明显<sup>[5]</sup>。区域内地势平坦,自然坡降为 1/8 000 ~ 1/12 000,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,主要植被有草本植物盐地碱蓬、灌木柽柳、芦苇、白茅等。

## 2 研究方法

### 2.1 样区布设与样品采集

2008年,根据以往对黄河三角洲地区植物群落

种类研究的相关结果<sup>[6]</sup>,并按照典型性和代表性的原则,沿黄河口滨岸至潮滩的演替带方向,选取较少人为扰动的区域布设9个采样点,其植被类型依次为:A 三棱蔗草(*Sparganiaceae*)—朝天委陵菜(*P. supina* L.); B 假苇拂子茅(*C. pseudophragmites* Koel.); C 白茅(*Imperata cylindrica*)—旱柳(*Salix matsudana* Koidz)少量柽柳; D 芦苇(*Phragmites communis* Trin.); E 芦苇—柽柳; F 柽柳(*Tamatis chinensis* Lour.); G 碱蓬—柽柳; H 碱蓬[*Suaeda salsa*(L.) Pall]; I 光滩。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。采样时,分别在每个样区内采集3个典型土壤剖面,其中A—E群落土壤剖面深度为80 cm, F—I群落土壤剖面深度为60 cm,每10 cm为一层,然后对3个剖面样品进行等层次混合,共采集样品64个。

### 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磷(TP)、全硫(TS)等,其中全磷利用采用氢氧化钠熔融—钼锑抗混合试剂比色法测定,全硫测定采用比浊法<sup>[7]</sup>。

### 2.3 土壤磷、硫密度及储量计算

土壤剖面第*i*层土壤的P(S)素平均密度( $\rho_{mi}$ )为相应层次土壤容重( $d_{vi}$ )与元素含量( $N_i$ )的乘积,即

$$\rho_{mi} = d_{vi} \times N_i \times 10$$

土壤剖面第*i*层土壤的P(S)库储量( $T_{ni}$ )为相应层次磷(硫)素密度与土壤厚度 $h_i$ 的乘积,即

$$T_{ni} = \rho_{mi} \times h_i / 100$$

单位面积一定剖面深度(*j*到*n*层)土壤P(S)库总储量( $T_n$ )为*j*到*n*层储量之和,即

$$T_n = \sum_{i=j}^n T_{si} = \sum_{i=1}^n d_{vi} \times N_i \times h_i / 10$$

$T_n$ ,  $T_{ni}$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ ,  $\rho_{mi}$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $d_{vi}$  的单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $N_i$  的单位为%,  $h_i$  的单位为 cm。

### 2.4 数据处理与分析

运用 SPSS 10.0 和 Origin 7.5 等软件对数据进行计算、作图以及基本统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被群落下 P 和 S 的分布特征

#### 3.1.1 水平方向上的分布特征 黄河口滨岸潮滩湿

地不同植被群落下土壤全磷的空间分布规律如图 1a 所示。

土壤全磷含量沿植被演替方向的变化规律不明显,不同群落土壤在 30—40 cm 土层全磷含量呈不规则“W”型变化,并于 E 群落出现一个峰值(743.695 mg/kg),以此点为分界向两边递减,但到光滩和演替末期又略有增加,这可能与该土层受到植被和成土母质的影响均较大有关<sup>[8]</sup>;其余各土层全磷含量均在 440~580 mg/kg 之间变化,不同植被群落之间仅略有差异,这可能受土壤类型和气候条件的影响,同时也与该区域植物的生产力水平以及枯落物的分解程度的难易有关<sup>[9]</sup>。

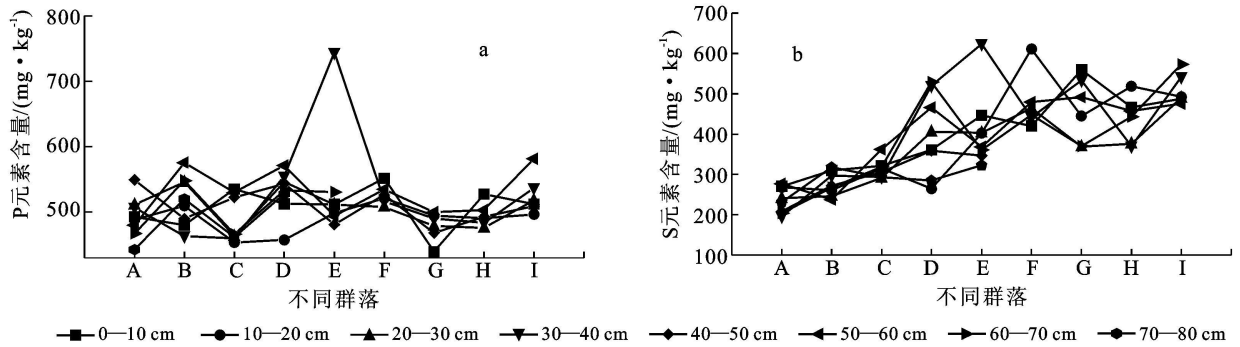


图 1 不同湿地植被群落土壤 P, S 水平分布特征

注:样点的植被类型依次为:A 三稜蔗草—朝天委陵菜;B 假拂拂子茅;C 白茅—旱柳—少量柁柳;D 芦苇;E 芦苇—柁柳;F 柁柳;G 碱蓬—柁柳;H 碱蓬;I 光滩。下同。

3.1.2 垂直方向上的分布特征 图 2 为不同植被群落下土壤中 P, S 的剖面分布特征。从图中可知,不同土壤中 P, S 的垂直分布既具有一定的相似性又存在一定差异性。就 P 元素而言,在所研究 9 种群落植被中, A 和 B 群落 P 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,但峰值所出现的土壤深度不同, A 群落出现在 40—50 cm 土层,而 B 群落出现在 35 cm 附近, 60 cm 以下土层相对于上层土壤均略有增加; C, D, G, H 群落土壤 P 含量的垂直分布特征较为相似,均呈“S”分布,其中 D 群落在 40—50 cm 土层出现较大波动,总体而言, 3 个群落都是在上层土壤中波动较大, 50 cm 土层以下 P 含量明显减少; E, F 群落土壤 P 含量的垂直分布特征较为相似,均呈单峰波动变化,但峰值所出现的土层不同, E 群落出现在 35 cm 土层附近,而 F 群落出现在 10—20 cm 土层,峰值过后,两个群落土壤 P 含量均随土壤深度增加而逐渐减少; I 光滩土壤 P 含量的垂直分布整体上随土壤深度增加而增加,但在 30—50 cm 的土层中出现较大波动。P 含量如上分布的原因可能主要与成土母质以及有机质分布的空间异质性有关。

不同植被群落土壤全硫空间分布见图 1b 所示,土壤全硫含量受植被类型影响显著,分布规律为演替初期含量较高,随后沿植被演替方向先逐渐增加后降低。不同土层的全硫含量最大值分布在 D 群落到 F 群落。这是由于芦苇等植物生产力较高,产生的枯落物较多,且不易分解,形成大量有机质积累。有机质含量高,但腐殖化程度弱,分解度低,导致全硫养分含量高,使得该植被群落土壤中硫含量明显高于其他植被群落土壤; D 群落之前的植被枯落物分解度高,全硫含量较低,而 D 群落之后,土壤为水成土的一类,处于嫌气还原状态,好氧微生物活动受阻,凋落物分解缓慢,硫含量低于芦苇区,但远高于演替后期植被。

此外,不同植被群落土壤中 P 含量垂直分布特征的差异主要与土壤水分条件差异、不同植物生产力高低不同、不同枯落物分解难易程度不同等因素有关<sup>[10]</sup>。

不同土壤中 S 含量的垂直分布特征更为明显。A 群落到 E 群落土壤中 S 含量的垂直分布特征较为相似,均随土层深度不同波动较大,整体上均呈先降低,中部土层出现增加趋势, 50 cm 之后 S 含量明显降低;而 F 到 I 群落土壤中 S 含量在整体上呈增加趋势,不同的是, F 群落和 H 群落土壤中 S 含量在 20 cm 以上呈递减趋势, 20 cm 以下呈递增趋势,规律明显,而 G 群落和 I 群落土壤中 S 含量在 20—50 cm 土层中出现较大波动,并无明显规律,但于 50 cm 以下呈明显增加趋势。一般而言, S 元素含量的垂直分布特征的不同主要受制于土壤有机质的分布<sup>[11]</sup>,据有关研究显示,沿着植物群落演替方向,有机质含量有随着演替方向先逐渐降低后增加的趋势,而表层土壤的有机质一般含量丰富,所以其含量均较高,演替中后期有机质垂直分布变异系数相对较大, S 含量相应出现较为明显的波动,演替前期和演替后期深层土壤中 S 含量变化趋势不同,其原因可能主要与成土母质

以及有机质分布的空间异质性有关。

此外, 不同植被群落土壤中 P, S 含量垂直分布特征的差异与不同环境土壤水分条件差异及其引起的不同质地土层 P, S 的垂直淋失有关。植被演替初期地表多积水或淹水, 水分条件较好, P 和 S 元素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; 而随着植被群落的演替, 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。不同植被群落土壤中 P 和 S 元素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。

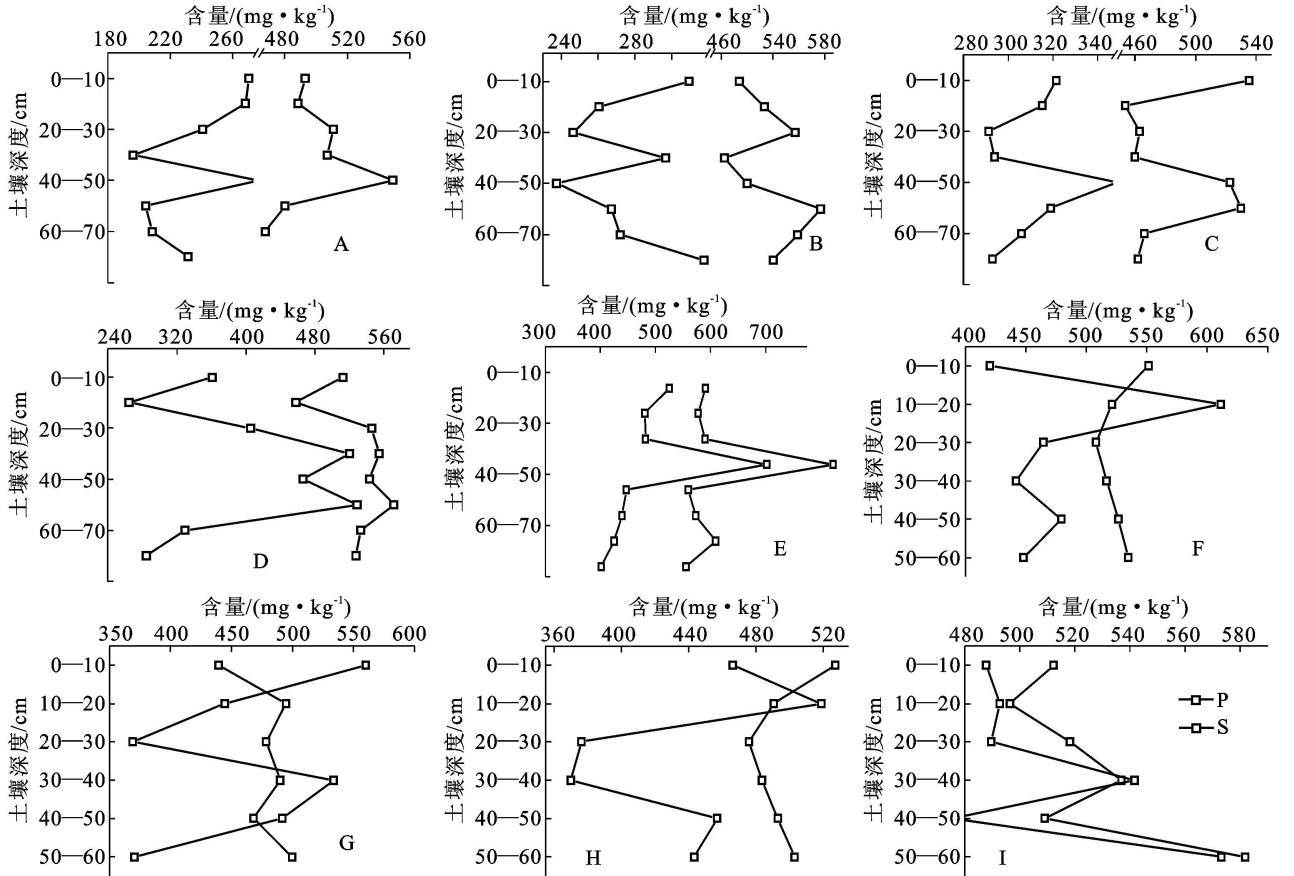


图 2 不同湿地植被群落土壤 P, S 垂直分布特征

### 3.2 不同湿地植被群落下湿地土壤中 P, S 的含量特征及其变异性

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:  $C_v < 10\%$  属于弱变异性;  $C_v = 10\% \sim 100\%$  属于中等变异性;  $C_v > 100\%$  属于强变异性。据表 1 可知, 全磷含量在演替初期(光滩无植被)较高, 从碱蓬区开始, 全磷沿着演替方向呈增加趋势, 在演替中期含量达到最高, 随后呈减少趋势, 变异系数较小。黄河口滨岸潮滩土壤中全磷含量与长江口湿地土壤总磷的含量相差不大; 沿着植物群落演替的方向, 全磷含量的变化规律不明显, 变异程度较低。除了 E 群落土壤(16.5%)属于中等变异性之外, 其余植被群落下均属弱变异性, 其原因在于土壤中磷的含量主要与成土母质有关, 其含量受土壤类型和气候条

件的影响, 受演替中植被群落结构变化影响较弱, 植被的生长对其起消耗作用, 因而其分布与有机质的分布相反, 所以在演替末期含量有所减少。

比较而言, 全硫含量沿植被演替方向的变化规律较为明显, 除光滩外, 全硫含量沿演替方向呈先增加后降低的变化趋势。

光滩土壤硫含量较高的原因是该区域土壤长时间处于淹水状态, 好氧微生物活动受阻, 有机质分解缓慢导致全养分含量较高; 全硫含量的分布主要与土壤中有有机质的分布有关, 植被覆盖区土壤中有有机质主要来源于植物枯落物, 根系并不充分参与有机质的形成, 演替初期生产力水平较低, 枯落物可较为彻底的分解, 且该区域土壤中硫由于水盐等条件作用极易氧化脱硫, 全硫含量较低, 演替中期植物生产力旺盛而分解不足导致全硫含量较高, 随着演替的进行, 土壤

中微生物也随之增加且土壤水盐环境亦有所改善,从而土壤中全养分含量降低。由表 1 亦可知, S 元素的变异性相对较大, 除 C 群落 (7.47%) 和 I 群落 (7.55%) 属于弱变异性, 其余植被群落下均属于中等变异性, 较高的垂直变异性主要与上下土层中影响硫含量分布的主导因素差异有关, 上层土壤中硫含量受外界环境条件、植物根系、水分条件以及化学过程等影响较为显著, 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<sup>[12]</sup>。

表 1 不同湿地植被群落下土壤 P, S 的变异性

项目	TP			TS		
	均值	标准差	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%
A	492.38	31.78	6.45	237.04	32.29	13.62
B	516.62	38.34	7.42	275.98	29.26	10.60
C	486.59	35.72	7.34	312.66	23.36	7.47
D	530.78	34.47	6.49	394.99	102.50	25.95
E	531.09	87.67	16.52	409.33	94.73	23.14
F	526.40	15.23	2.89	477.50	68.59	14.36
G	478.44	22.22	4.65	461.52	81.11	17.58
H	495.59	18.02	3.64	438.73	56.81	12.95
I	525.76	30.40	5.78	510.09	38.43	7.53

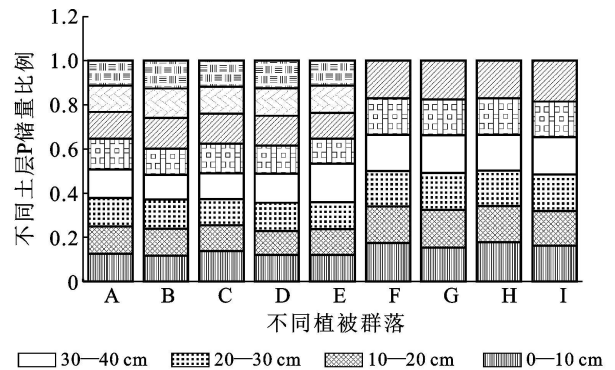
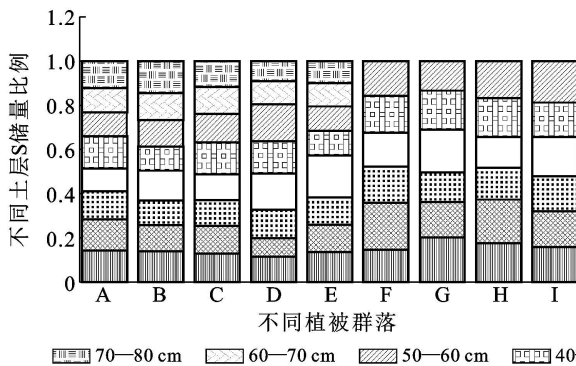


图 3 不同土层元素储量分布状况

表 2 不同湿地植被群落下土壤中 TP, TS 储量

项目	样点									kg/m <sup>2</sup>
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
TP	0.447*	0.420*	0.424*	0.432*	0.409*	0.300**	0.290**	0.325**	0.346**	
	(0.348**)	(0.324**)	(0.331**)	(0.333**)	(0.319**)					
TS	0.215*	0.229*	0.240*	0.325*	0.328*	0.250**	0.278**	0.325**	0.312**	
	(0.168**)	(0.174**)	(0.187**)	(0.260**)	(0.256**)					

注: \* 0—80 cm; \*\* 0—60 cm。

### 3.3 不同湿地植被群落下湿地土壤中 P, S 储量

不同湿地植被群落下土壤中 0—80 cm (0—60 cm) 土层 P, S 储量及其分布状况分别于表 2 和图 3 所示。据此可知, 不同植被群落下土壤中全磷储量相差不大, A 到 E 群落土壤 0—80 cm 土层磷储量在 0.40~0.45 kg/m<sup>2</sup> 之间变化, 变异性很小, 可以认为储量相近, F 到 I 群落土壤 0—60 cm 土层磷储量在 0.29~0.35 kg/m<sup>2</sup> 之间变化, 具有很小的变异性且与 A 到 E 群落土壤 0—60 cm 深度下磷储量 (0.32~0.35 kg/m<sup>2</sup>) 相差不大; 同一植被群落下土壤各个土层中磷储量在总储量中所占的比例均在 10% 左右, 同一样点不同土层间磷储量的变化不大。相对而言, 不同植被群落下土壤中硫储量的变化较为明显, 随群落演替方向呈“S”型波动变化, 演替初期硫储量较高 (0.32 kg/m<sup>2</sup>, 0—60 cm), 而后降低一定程度后开始增加, 到演替中期又到达一个峰值 (0.33 kg/m<sup>2</sup>, 0—80 cm; 0.26 kg/m<sup>2</sup>, 0—60 cm), 然后沿演替方向降低, 末期达到最低值 (0.21 kg/m<sup>2</sup>, 0—80 cm; 0.17 kg/m<sup>2</sup>, 0—60 cm); 然而, 就同一土壤中不同土层硫储量来看, 各个土层中硫储量相差不大。

## 4 结论

(1) 不同植物群落的土壤中磷含量变化不大, 沿群落演替方向并无明显的变化规律, 变异系数较小; 硫含量沿群落演替方向有较为明显的变化规律。

(2) 不同植被群落土壤中 P 和 S 元素的垂直分布特征规律不明显, 呈不规则波动变化, 分布主要受制于土壤有机质的分布, 有机质含量高, 分解度低的条件下, 全量养分含量较高; 相反, 分解度高的土层全量养分含量较低。此外不同土壤中的水分条件差异

以及土壤中好氧微生物的活动也影响元素在土壤中的垂直分布特征。

(3) 不同植被群落土壤中磷的垂直变异性很小, 除 E 群落(16.5%)属中等变异性外, 其余群落中均为弱变异性( $> 10\%$ ), 这与研究区域土壤不同土层的成土母质差异不大有关; 硫元素在不同土层有较高的垂直变异性, 除 C 群落(7.4%)和 I 群落(7.55%)属于弱变异性, 其余植被群落下均属于中等变异性( $< 10\%$ ), 这可能与上下土层影响硫分布的主导因素差异有关。

(4) 不同植被群落土壤的磷储量及其分布状况差异不大, 不同土壤的磷储量均在  $0.32 \text{ kg/m}^2$  (0—60 cm)附近波动; 而不同土壤中硫储量存在较大差异, 沿演替方向呈“S”型波动变化, 最高值出现在 H 群落( $0.325 \text{ kg/m}^2$ , 0—60 cm), 最低值出现在演替末期( $0.168 \text{ kg/m}^2$ , 0—60 cm), 但其分布状况差异不大。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Thornton S E, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland Estuarine[ J ]. *Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.
- [ 2 ] Tanner C C, D' Eugenio J, McBride G B et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[ J ]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(1): 67-92.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 白军红, 邓伟, 王庆改, 等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[ J ]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 599-603.
- [ 5 ] 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.
- [ 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 ] 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.
- [ 8 ] 全为民, 韩金娣, 平先隐, 等. 长江口湿地沉积物中的氮、磷与重金属[ J ]. *海洋科学*, 2008, 32(6): 98-102.
- [ 9 ] 王爱萍. 长江口滨海湿地磷的迁移转化及净化功能的研究[ D ]. 上海: 同济大学, 2005.
- [ 10 ] 陈海霞, 付为国, 王守才, 等. 镇江内江湿地植物群落演替过程中土壤养分动态研究[ J ]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1475-1480.
- [ 11 ] 于海涛, 魏江生, 周梅, 等. 兴安落叶松林下冻土中硫元素分布规律研究[ J ]. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(4): 73-77.
- [ 12 ] 杨力, 刘光栋, 宋国菡, 等. 山东省土壤有效硫含量及分布[ J ]. *山东农业科学*, 1998(2): 3-6.
- [ 13 ] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[ J ]. *地理学报*, 2006, 61(5): 482-490.
- [ 14 ] 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 塔里木河源流水资源变化趋势预测[ J ]. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 708-711.
- [ 15 ] 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 塔里木河流域水文过程的特点初探[ J ]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 156-170.
- [ 16 ] 陈曦. 中国干旱区土地利用与土地覆被变化[ M ]. 北京: 科学出版社, 2008: 110-116.
- [ 17 ] 周宏飞, 张捷斌. 新疆的水资源可利用量及其承载能力分析[ J ]. *干旱区地理*, 2005, 28(8): 756-763.
- [ 18 ] 胡安焱. 干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研究: 以塔里木河为例[ D ]. 陕西西安: 长安大学, 2003: 103-110.
- [ 19 ] 郝兴明, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河干流年径流量变化的人类活动和气候变化因子甄别[ J ]. *自然科学进展*, 2008, 18(22): 1409-1416.
- [ 20 ] 新疆维吾尔自治区人民政府, 中华人民共和国水利部. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[ R ]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 2002: 18-20.
- [ 21 ] 王世江. “水权塔河”体制绩效与未来远景[ J ]. *干旱区地理*, 2007, 30(3): 328-336.
- [ 22 ] 邓铭江. 中国塔里木河治水理论与实践[ M ]. 北京: 科学出版社, 2009: 453-454, 486-493.
- [ 23 ] 夏军, 陈曦, 左其亭. 塔里木河河道整治与生态建设科学考察及再思考[ J ]. *资源科学*, 2008, 23(5): 745-753.