

# 黄河三角洲滨海湿地土壤硫含量分布特征

于君宝<sup>1</sup>, 褚磊<sup>1,2</sup>, 宁凯<sup>1,2</sup>, 韩广轩<sup>1</sup>, 管博<sup>1</sup>, 屈凡柱<sup>1,2</sup>, 战超<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 根据植被分布特征和土地利用状况, 采用网格法在黄河三角洲滨海湿地布设采样点, 并定期采样, 研究滨海湿地土壤总硫含量分布特征及其影响因素。结果表明, 黄河三角洲滨海湿地0~30 cm深土层的平均总硫质量比约为822.43 mg/kg, 高于世界平均水平。在研究区域内, 土壤总硫分布差异较大, 新生湿地土壤总硫含量相对最高, 其次为退化湿地, 稳定湿地土壤总硫含量相对最低; 从土地利用类型来看, 无植被覆盖区的土壤总硫含量最高, 自然植被覆盖区的土壤总硫含量次之, 农田和防护林区的土壤总硫含量相对最低; 空间上土壤总硫含量表现为由海岸到内陆呈递减趋势。在新生天然湿地内, 土壤总硫含量水平分布从光滩到河滩呈现显著下降趋势, 垂直分布上具有高度的变异性。冲淤沉积物和海水是黄河三角洲滨海湿地土壤硫的主要来源, 而人类活动和植物作用是土壤硫空间分异的关键因素。

**关键词:** 总硫含量; 分布特征; 影响因素; 滨海湿地; 黄河三角洲

中图分类号: X142; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-5948(2014)05-559-07

硫是湿地生物地球化学循环的重要元素之一, 通过酸沉降、地表径流和植物吸收等途径进入湿地, 同时以 $H_2S$ 、 $DMS$ 、 $COS$ 、 $DMDS$ 和 $CS_2$ 等含硫气体形式在湿地中释放<sup>[1,2]</sup>, 而湿地土壤是硫生物地球化学过程的重要载体。湿地土壤中硫等元素的时空分布特征不仅能反映湿地土壤结构状况和养分的可利用水平, 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>。

黄河三角洲地区湿地面积大, 类型多, 结构复杂, 独特的自然地理位置和气候特征使该地区蕴藏着丰富的湿地资源, 是世界上生物多样性最丰富的地区之一。由于自身的典型性和特殊性, 黄河三角洲湿地成为维护物种多样性和监测环境污染的重要科研场所。目前, 已有不少学者在黄河三角洲开展了湿地元素生物地球化学过程研究<sup>[4-7]</sup>, 但是对此区域内土壤中硫分布的研究较少, 且主要是集中在小区域样带上的研究<sup>[8,9]</sup>, 在大范围尺度衡量硫空间分布的研究尚未见报道。本研究选择黄河三角洲新生滨海湿地、退化湿地和稳定湿地等大范围样区以及小尺度典型植物演

替样带区为研究对象, 分析黄河三角洲总硫的空间分布规律及其影响因素, 为进一步探讨气候变化影响下滨海湿地元素生物地球化学循环过程和湿地资源可持续利用研究提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区

大尺度研究区主要为1855年以后形成的黄河三角洲, 可分为新生湿地、退化湿地和稳定湿地3个组成部分(图1)。本研究将大尺度研究区的土地类型划分为无植被覆盖区(河滩、荒地和光滩)、以香蒲(*Typha orientalis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、盐地碱蓬(*Suaeda heteroptera Kitagawa*)和天然柳林(*Salicaceae*)等为优势种群的自然植被覆盖区、农田和防护林区(棉花田、玉米、麦田和防护林等)3大类型。小尺度研究区域位于黄河三角洲湿地保护区内的新生滨海湿地, 主要为1996年黄河改道后形成的新生湿地, 人为干扰小, 优势植物包括盐地碱蓬、芦苇、柽柳和白茅(*Imperata cylindrical*)等。

收稿日期: 2013-11-11; 修订日期: 2014-07-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)、山东省自然科学基金项目(JQ201114)和中国科学院—国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(Y02A071041)资助。

作者简介: 于君宝(1968-), 吉林省长春人, 研究员, 主要研究方向为元素生物地球化学与生态修复。E-mail: junbao.yu@gmail.com

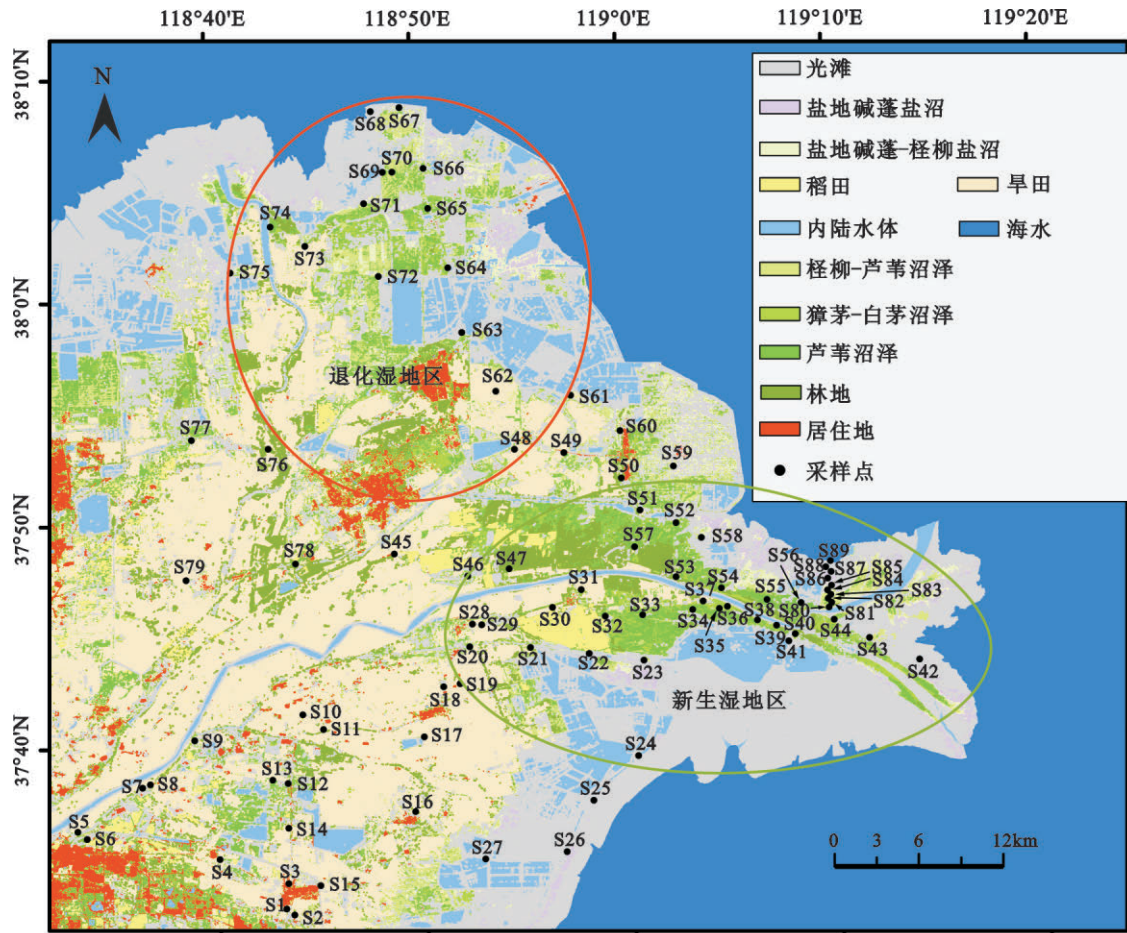


图1 黄河三角洲土地利用及采样点分布图

Fig.1 The map of land use and sampling sites of the Yellow River Delta

研究区属温带季风型大陆性气候,四季分明,春季干旱多风回暖快,夏季炎热多雨,秋季凉爽多晴天,冬季寒冷少雪干燥。年平均气温为12.1℃,无霜期为196 d,年降水量为551.6 mm,70%的降水集中于7月和8月,年蒸发量为1962 mm。土壤为隐域性潮土和盐土。

### 1.2 样品采集

根据植物分布和土地利用状况,采用网格法在黄河三角洲区域共布设79个固定采样点S1~S79(图1),在2009年5月~2012年9月,分层采集0~30 cm深土壤,自上而下每层隔10 cm取样,共取3层。按照天然湿地植物分布规律,在新生天然湿地(小尺度样带)上分两组布设10个平行采样点S80~S89(图1和图2),从河至海方向依次为河滩、三棱蔗草(*Scirpus mariqueter*)—朝天委陵菜(*Potentilla supine*)区、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudo-phragmites*)区、白茅区、芦苇区、盐地碱蓬—芦苇区、盐地碱蓬—柽柳区、盐地碱蓬—柽柳(过渡带)

区、盐地碱蓬区和无植被光滩区。小尺度样带设置的目的之一是监测土壤理化指标的月变化,因此,在每年的植物生长季(5~10月)按月分层采集土壤样品,采样深度为60 cm,每层10 cm。

土壤样品经自然风干后研磨,过100目筛待测。土壤硫元素和氮元素含量采用Vario MAC-CRO cube型大进样量元素分析仪(德国Elementar公司)测定。有机质含量采用TOC-VCPH型有机碳分析仪(日本岛津公司)测定,土壤容重和含盐量等理化指标采用常规方法测定。

### 1.3 数据处理

采用SAS8.0软件分析处理数据,采用Excel 2003软件作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄河三角洲滨海湿地土壤硫含量的空间分布

新生湿地、退化湿地和稳定湿地土壤中硫含量的分布见表1。黄河三角洲滨海湿地土壤中总

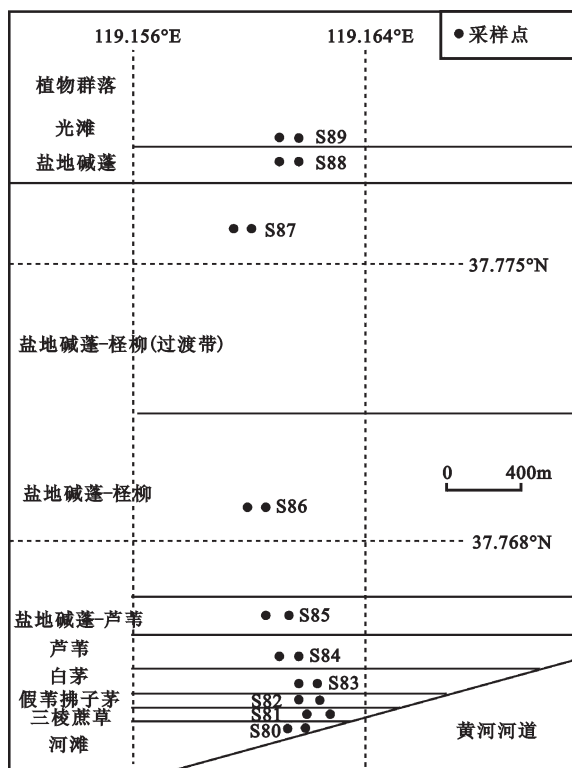


图2 新生自然滨海湿地监测样带上的采样点分布

Fig.2 The sample sites in transects in new-born natural coastal wetlands

硫的平均质量比为 822.43 mg/kg(0.08%),处于较高水平,高于中国吉林西部向海湿地土壤的0.07%<sup>[10]</sup>和世界土壤的平均含量的0.07%<sup>[11]</sup>,但低于中国南方红树林湿地土壤的0.207%<sup>[12]</sup>。Howarth R W<sup>[13]</sup>和 Haering K等<sup>[14]</sup>研究表明,湿地土壤硫含量的差异与可获得的铁源有关,当湿地含有丰富的铁元素时,硫元素主要以FeS<sub>2</sub>形式积累。黄河三角洲滨海湿地土壤发育处于初始阶段,土壤结构发育程度低,暗色矿物较多,因此母质里铁含量也较多<sup>[15]</sup>。相关研究发现,黄河三角洲新生滨海湿地土壤中硫质量比为22.25 g/kg,约是中国和世界土壤平均值的2倍<sup>[16]</sup>,这很好地解释了黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量偏高的原因。

单因素方差分析结果显示,黄河三角洲不同湿地类型0~30 cm深土壤中,总硫的平均含量表现为新生湿地最高,退化湿地次之,稳定湿地最低( $p < 0.01$ )。退化湿地由于岸线蚀退和海平面上升等原因,植被遭到毁坏,植物对土壤中硫元素的返还和固定积累减弱,造成了土壤中硫元素的流失。稳定湿地土壤中总硫的含量显著小于新生湿地和退化湿地,原因可能为内陆天然湿地多被开

表1 黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量的分布  
Table 1 The contents of total sulfur in soil in coastal wetlands of the Yellow River Delta

类型	土层深度(cm)	平均总硫质量比(mg/kg)	标准差	变异系数	样本数
新生湿地	0~10	960.44	389.87	40.59	40
	10~20	959.11	630.75	65.76	40
	20~30	895.77	523.31	58.42	40
退化湿地	0~10	938.44	418.72	55.36	40
	0~10	848.40	228.86	26.98	18
	10~20	775.16	128.64	15.95	18
稳定湿地	20~30	737.04	166.65	22.61	18
	0~10	786.86	123.33	22.74	18
	0~10	636.40	269.28	42.31	21
全部湿地	10~20	634.99	230.40	36.28	21
	20~30	646.33	263.39	40.75	21
	0~30	650.60	204.98	37.68	21
全部	0~10	839.92	358.00	42.62	79
	10~20	826.21	491.76	59.52	79
	20~30	790.54	421.11	53.27	79
全部	0~30	822.43	347.54	57.9	79

垦占用,转变为棉田等农业用地,破坏了原土结构,导致硫元素含量显著降低。新生湿地土壤中的硫元素主要来源于海水和冲淤积的黄土,长距离的运输导致泥沙中的碳、氮等元素在输运过程中大量流失,而铁、锰等元素含量富集,而硫元素与铁元素极易结合,从而使新生湿地土壤中硫的含量高于退化湿地和稳定湿地。

营养元素的分布与土地利用方式存在极其密切的关系<sup>[2]</sup>。本研究黄河三角洲滨海湿地的13种土地利用方式中,光滩土壤的平均总硫质量比最高,为1 144.45 mg/kg,玉米田土壤的平均总硫质量比最低,为424.07 mg/kg(图3)。光滩土壤中,总硫含量约为农田土壤总硫含量的3倍,这也验证了硫元素来源于海水和淤积黄土颗粒的理论,同时说明农业耕作对硫元素的移除作用。根据植被状况和人类活动影响可将研究区土地分为无植被覆盖区、自然植被覆盖区、农田和防护林区3个类型。方差分析结果显示,这3个类型的土壤总硫含量差异显著( $p < 0.05$ ),土壤总硫含量最高的为无植被覆盖区,其次是自然植被覆盖区,土壤总硫含量最低的是农田和防护林区(图3),这一结果说明,人类活动是导致区域硫空间分异的主要原因

之一。在无植被覆盖区,光滩的土壤总硫含量最高,其次为河滩,荒地的土壤总硫含量最低;自然植被覆盖区中,怪柳的土壤总硫含量最高,芦苇/碱蓬的土壤总硫含量较高,香蒲/柳林的土壤总硫含量最低(“/”表示差异不显著,下同);农田和防护林区中,大豆的土壤总硫含量最高,棉花田/麦田的土壤总硫含量较高,防护林/玉米的土壤总硫含量最低。无植被区以光滩为主,土壤中的硫元素主要来源于黄土沉积颗粒硫的累积,而农田土壤硫含量相对较低主要是随着人类对黄河三角洲的利用,大量的原生湿地被开垦为农田使得湿地原有结构遭到破坏,土壤总硫含量大幅下降,从而使农田和防护林区土壤总硫含量显著低于自然植被覆盖区,实际上湿地开垦会引起土壤中硫元素的大量流失,这在东北三江平原湿地<sup>[17]</sup>和南方红树林湿地<sup>[18]</sup>的研究中都有发现。

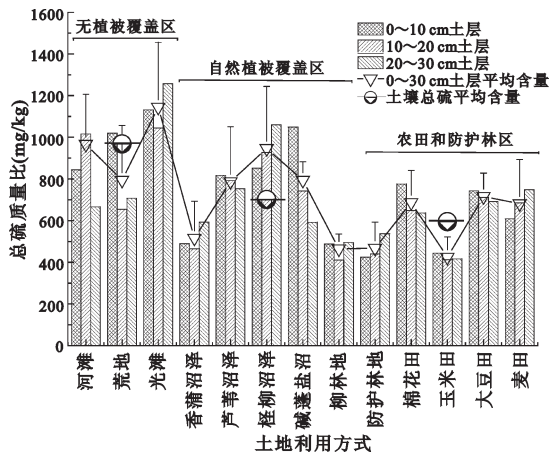


图3 各土地利用方式下土壤总硫含量  
Fig.3 The contents of total sulfur in soils of various ways of land use

为了探讨陆海相互作用对滨海区域土壤硫元素分布的影响,将大区域尺度上采样点根据垂直海岸方向由近及远以5 km为梯度划分样地(共分为6组)。为排除黄河水侧渗对土壤理化性质的影响<sup>[9]</sup>,剔除距离黄河河岸3 km以内的采样点。结果表明,0~30 cm深各土层总硫含量由海岸到内陆呈递减趋势,且0~30 cm深土壤总硫的平均含量随着海岸到陆地距离的增加而减小( $R^2 = 0.892 2$ ) (图4)。在近海区域,除了新淤积土粒中原来固定的硫元素以外,海水也可能是土壤中硫元素的重要来源。在较高的土壤含水量条件下,嫌气还原状态使还原硫的专性厌氧菌如脱磷弧菌属进行厌

氧呼吸,使硫酸盐发生还原反应生成0价和-2价的硫<sup>[20]</sup>, $Fe^{2+}$ 和 $S^{2-}$ 结合成 $FeS$ 和 $FeS_2$ ,从而把海水中的硫酸盐固定<sup>[21,22,23]</sup>,而湿地植物吸收了硫酸根后,以总硫含量较高的枯落物形式归还土壤,从而使土壤中总硫含量大大增加<sup>[12,24]</sup>。另外,黄河三角洲是由黄河携带泥沙填海造陆形成,受河流顶托和海潮侵袭等影响,土壤含盐量高<sup>[25]</sup>,含盐量由近海岸到内陆随着距离和海拔高度的增加而递减<sup>[26]</sup>,而湿地的总硫含量与盐度呈显著正相关关系<sup>[12]</sup>,土壤盐度差异是影响硫的关键因子<sup>[27]</sup>。因此,海水中硫元素的输入及土壤盐度由海洋到陆地递减是土壤硫含量从海洋到陆地减少的主要原因。

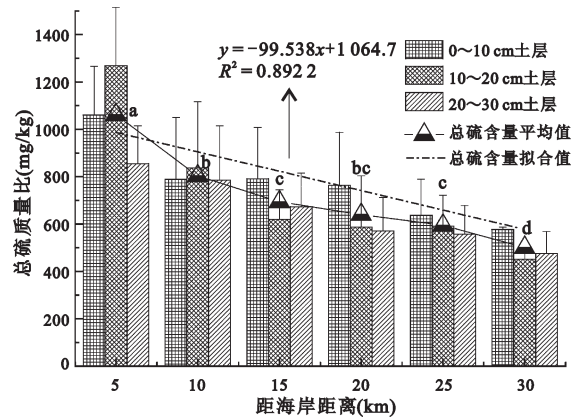


图4 黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量从海洋到陆地的变化

Fig.4 The variation from sea to land of contents of total sulfur in soils in coastal wetlands of the Yellow River Delta

从土壤硫元素在0~30 cm深土层中分布的统计结果看,虽然湿地土壤中总硫含量由表层向下呈下降趋势,但总的来说各层土壤之间总硫含量差异不显著( $p > 0.05$ ) (表1)。这与三江平原内陆沼泽湿地土壤总硫沿剖面显著递减的研究结果有所差异,三江平原土壤总硫和有机质联系密切,在土壤剖面上总硫含量随着有机质含量减少而递减<sup>[28]</sup>。而黄河三角洲土壤硫元素的垂直分布很可能与高铁和高盐有关,导致各土层之间总硫含量无显著差异。从各土地利用方式来看,除怪柳、麦田、河滩和荒地土壤各层差异显著( $p < 0.05$ )外,其余无显著差异。存在差异的原因与不同植物对硫的吸收和分解归还能力<sup>[21,29]</sup>及不同类型植物的根系对营养元素在土壤中的迁移状况影响有关<sup>[30]</sup>。

黄河三角洲滨海湿地总硫的时空分布具有较高的异质性(表1)。按Cambardella C A等<sup>[31]</sup>对变

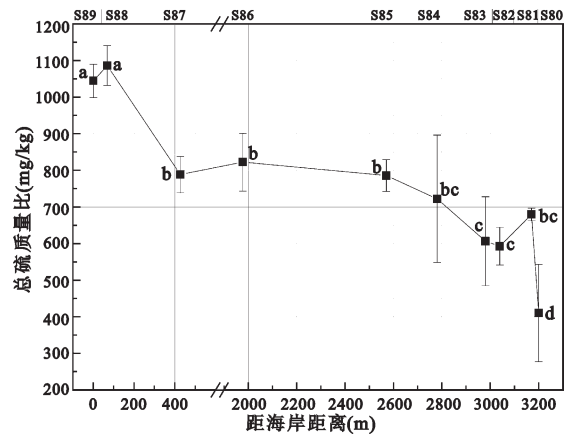
异系数的分级标准,当变异系数小于10%,属于弱变异性;当变异系数在10%~100%,属于中等变异性;当变异系数大于100%,属于强变异性。由表1可知,黄河三角洲湿地土壤总硫分布整体属于中等变异。研究表明,大气硫沉降、母质、水文和植被等因素的差异,是土壤硫元素空间异质性的主要原因<sup>[32,33]</sup>,而黄河三角洲湿地硫元素空间变异主要与人类活动和盐分影响有关。例如,研究区域内旱田面积仅约占总面积的30%,强烈的人为活动必然导致营养元素分布的异质性。

### 2.2 黄河三角洲天然滨海湿地典型样带土壤硫含量分布

为了研究天然湿地土壤硫含量分布情况,本研究在黄河三角洲新生湿地区从黄河河滩到光滩方向布设了平行定位监测样带(图1、图2,采样点S80~S89),该区域主要为1996年黄河改道后形成的新生天然湿地,人为干扰小。结果表明,土壤总硫质量比在光滩向河滩植物演替方向上呈降低趋势,最大值为1086.22 mg/kg,位于采样点S88(碱蓬区),最小值为409.99 mg/kg,位于采样点S80(黄河河滩),且在采样点S81~S84、采样点S85~S87和采样点S88~S89之间无显著差异(图5),这种变化趋势充分体现了海水作用对硫元素分布的影响。靠近河岸的采样点因为受黄河水侧渗影响而导致土壤总硫含量较小<sup>[19]</sup>;采样点S88和采样点S89是碱蓬沼泽和光滩,受低潮影响频繁,两地都以海水作为重要的硫输入源,因此这两个区域土壤总硫含量保持较高的水平<sup>[21]</sup>。结合土壤容重数据,估算出黄河三角洲天然湿地在0~60 cm深土层总硫密度为355~700 g/m<sup>2</sup>,平均值约为(480±130) g/m<sup>2</sup>。

土壤硫含量在小区域典型样带上垂直分布如图6。根据总硫在各土层自上而下的分布特征,可将其分为4种类型:①单调递增(采样点S83)或递减分布(采样点S80);②不规则波动分布(采样点S81、S82、S84、S85、S86和S87);③呈“C”型分布(采样点S89);④无显著变化(采样点S88)。可以看出,除光滩外,黄河到海岸中间区域的土壤剖面总硫含量变化程度显著高于滨海和近河区域,于海涛等<sup>[24]</sup>研究显示,土壤硫含量的垂直分布受制于各土层中的有机质含量。样带上的不同植物群落,其有机质以枯落物形式返还于样带各区域土壤中,且演替的植物群落土壤有机质垂直分布变

异系数相对较大,硫含量随之波动显著。而河滩和光滩受黄河淡水和海水的影响较大,使得采样点S80和采样点S89的土壤剖面硫元素含量分别为最低值和最高值。另外,植物根系和硫的淋溶对底层土壤影响较小,靠近底层的土壤总硫含量分布主要与土壤的成土母质和盐分状况有关<sup>[35]</sup>。



注:相同字母表示差异性不显著。下同。

图5 黄河三角洲新生天然湿地土壤总硫含量的水平分布  
Fig.5 The horizontal distribution of contents of total sulfur in soils of new-born natural wetlands of the Yellow River Delta

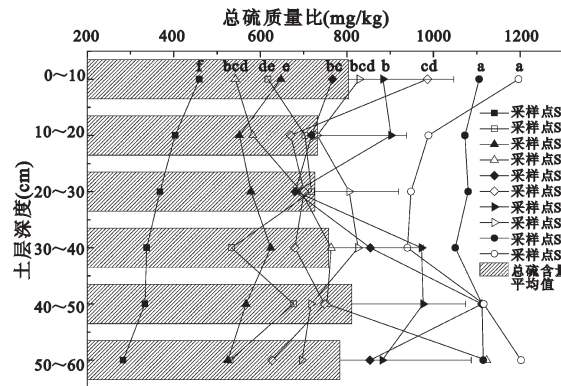


图6 黄河三角洲新生天然湿地土壤总硫含量的垂直分布  
Fig.6 The vertical distribution of contents of total sulfur in soils of new-born natural wetlands of the Yellow River Delta

### 2.3 黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量分布与土壤理化因子关系

土壤保持硫元素的能力主要取决于土壤的理化性质(表2)。结果可知,盐分是影响黄河三角洲滨海湿地土壤中硫元素分布的主要影响因素之一,二者相关性达到极显著水平。在滨海地区,盐分主要来源于海水,海水中硫元素和盐分的输入具有一致性,由此可见,除了土壤母质外,黄河三角洲滨海湿地海水中的硫是土壤硫元素的重要输入源,而人类活动和植物作用加剧了硫的分异作

用,该观点与关于潮汐和植被导致的土壤盐度差异是影响硫关键因子的这一结果具有一致性<sup>[27]</sup>。同时,黄河三角洲滨海湿地土壤总硫的分布同有机质含量和总氮含量也显著相关( $p < 0.01$ )<sup>[12,17]</sup>,一般有机质含量高的土壤,总硫含量也较高<sup>[28]</sup>。有机质中,氮和硫官能团含量较高<sup>[24]</sup>,这可能是土壤总硫含量与有机质和总氮关系密切的原因。此外,滨海地区土壤中铁元素含量丰富,硫元素以 $FeS_2$ 形式积累,植物枯落物对硫元素的分解释放,植物根对硫元素的迁移都对土壤总硫含量及分布有较大的影响。由此可见,黄河三角洲滨海湿地土壤总硫的空间分布是陆海相互作用、人类活动、冲淤积成陆过程和植物综合作用的结果。

表2 黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量与其他土壤参数的相关系数

Table 2 The correlation coefficients of contents of total sulfur and other parameters in soils in coastal wetlands of the Yellow River Delta

	容重	有机质含量	总氮含量	碳氮比	盐度	总硫含量
容重	1	-0.28	-0.25	0.39*	-0.44*	-0.14
有机质含量		1	0.93**	0.76**	0.56**	0.62**
总氮含量			1	0.55**	0.61**	0.74**
碳氮比				1	0.40*	0.35
盐度					1	0.71**
总硫含量						1

注:\*\*表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关;\*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关。

### 3 结论

黄河三角洲0~30 cm土层土壤中总硫平均质量比为822.43 mg/kg,高于世界土壤硫含量平均水平。其中,新生湿地、退化湿地和稳定湿地土壤中总硫质量比平均值分别为938.44 mg/kg、786.86 mg/kg和650.60 mg/kg,且总硫含量在土壤0~30 cm深土壤中由表层向下呈下降趋势,但无显著差异。

不同土地利用方式中,无植被覆盖区土壤总硫含量最高,其次为植被覆盖区,农田和防护林区土壤总硫含量最低,光滩土壤中总硫含量约是农田土壤中总硫含量的3倍。在空间上,土壤总硫含量由海岸到陆地呈递减趋势,土壤中总硫含量分布差异较大。

天然滨海湿地中,土壤总硫含量水平分布呈

现出从河滩到光滩上显著的升高趋势,而在土壤垂直分布上具有很大的变异性,规律不明显。

黄河三角洲滨海湿地土壤总硫含量的分布主要受土壤有机质含量、总氮含量和盐度的影响。

**致谢:**本研究得到中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站的大力支持,在此表示感谢。

### 参考文献

- [1]杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点, 进展与展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111~120.
- [2]Morrison M C, Hines M E. The variability of biogenic sulfur flux from a temperate salt marsh on short time and space scales[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990, 24(7): 1 771-1 779.
- [3]丁秋祯, 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): 2 092~2 097.
- [4]董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物—土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1 594~1 599.
- [5]屈凡柱, 于君宝, 孟灵, 等. 黄河三角洲滨海湿地碱蓬群落土壤树脂磷测定及剖面分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 150~203.
- [6]王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1 439~1 445.
- [7]牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 等. 黄河口滨岸潮滩不同表现型翅碱蓬K, Ca, Mg含量与累积的季节变化[J]. 草业学报, 2011, 19(3): 177~190.
- [8]孙万龙, 孙志高, 林光辉, 等. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬硫元素的季节变化[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 303~310.
- [9]于君宝, 董洪芳, 王慧彬, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤金属元素空间分布特征[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 297~304.
- [10]王国平, 刘景双, 张玉霞. 向海湿地全硫与有效硫垂向分布[J]. 水土保持通报, 2003, 23(2): 5~8.
- [11]Lindsay W L. Chemical equilibria in soils[M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd., 1979.
- [12]林慧娜, 傅娇艳, 吴浩, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中硫的分布特征及影响因素[J]. 海洋科学, 2009, 33(12): 79~82.
- [13]Howarth R W. The ecological significance of sulfur in the energy dynamics of salt marsh and coastal marine sediments[J]. Biogeochemistry, 1984, 1(1): 5-27.
- [14]Haering K, Rabenhorst M, Fanning D. Sulfur speciation in some Chesapeake Bay tidal marsh soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 500-505.
- [15]东野光亮, 陈介福, 须湘成. 黄河三角洲土壤的微形态特征[J]. 土壤通报, 1993, 24(3): 102~104.
- [16]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.
- [17]郝庆菊,王起超,王其存,等. 三江平原典型湿地及其开垦后土壤中总硫变化的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2 191~2 194.
- [18]袁彦婷,丁振华,张玲,等. 土地利用方式改变对红树林沉积物中营养元素含量的影响[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 385~390.
- [19]范晓梅,刘高焕,束龙仓,等. 调水调沙对河口地区地下水动态的影响[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 34~35.
- [20]白军红,邓伟,朱颜明. 湿地生物地球化学过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2002, 21(1): 53~57.
- [21]张汝国. 珠江口红树林硫的累积和循环研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1996, 5(2): 67~73.
- [22]罗敏,曾从盛,全川,黄佳芳. 滨海潮滩铁异化还原研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 527~532.
- [23]郑春雨,王光华. 湿地生态系统中主要功能微生物研究进展[J]. 湿地科学, 2012, 12(2): 243~249.
- [24]林鹏,陈荣华. 红树林有机碎屑在河口生态系统中的作用[J]. 生态学杂志, 1991, 10(2): 45~48.
- [25]安永会,张福存,姚秀菊. 黄河三角洲水土盐形成演化与分布特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 65~70.
- [26]宋创业,刘高焕,刘庆生,等. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2 042~2 048.
- [27]曾从盛,王维奇,翟继红. 闽江河口不同淹水频率下湿地土壤全硫和有效硫分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 246~250.
- [28]郝庆菊,王起超,王跃思. 三江平原典型湿地土壤中硫的分布特征[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 331~335.
- [29]林舜华,黄银晓. 海河流域植物硫素含量特征的研究[J]. 生态学报, 1994, 14(3): 235~242.
- [30]姚凯,刘映良,黄俊学. 喀斯特地区植物根系对土壤元素迁移的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 81~82.
- [31]Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1 501-1 511.
- [32]陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 283~307.
- [33]高义民,同延安,胡正义,等. 陕西省农田土壤硫含量空间变异特征及亏缺评价[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 938~944.
- [34]于海涛,魏江生,周梅,等. 兴安落叶松林林下冻土中硫元素分布规律研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 4: 15.
- [35]杨力,泉维洁. 山东省土壤有效硫含量及分布[J]. 山东农业科学, 1998, (2): 3~6.

## Distribution Characteristics of Sulfur Content in Soils in Coastal Wetlands of the Yellow River Delta

YU Jun-bao<sup>1</sup>, CHU Lei<sup>1,2</sup>, NING Kai<sup>1,2</sup>, HAN Guang-xuan<sup>1</sup>, GUAN Bo<sup>1</sup>, QU Fan-zhu<sup>1,2</sup>, ZHAN Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

**Abstract:** According to vegetation distribution characteristics and land use status, the soil samples were collected regularly from the fixed sample sites which selected in coastal wetland of the Yellow River Delta based on grid method to study the distribution characteristics of soil total sulfur and its influencing factors. The results showed that the average contents of total sulfur in 0~30 cm soil of the Yellow River Delta wetland was about 822.43 mg/kg, which was higher than the average value of total sulfur in world. The difference of total sulfur in soil was significant in the region scale. The contents of total sulfur in soil from high to low was new-born wetlands, degraded wetlands and stable wetlands. For different land use types, the contents of total sulfur in soil from high to low were non-vegetation-covered area, natural vegetation-covered area, farmland and shelter forest area. There was an obvious descending trend of the contents of total sulfur in soil from coastline to inland. In the natural new-born coastal wetlands, the contents of total sulfur in soil tended to decrease from bare tidal flat to river bank. The vertical distributions of the contents of total sulfur in soil showed a high degree of variability. Our results confirmed that the alluvium-deposited sediment and seawater are dominant sources of sulfur in soil in coastal wetlands of the Yellow River Delta, and the human being activities and vegetation were key factors for spatial distribution of sulfur in soil in the study region.

**Keywords:** content of total sulfur; distribution characteristics; influence factors; coastal wetlands; the Yellow River Delta