

互花米草盐沼湿地土壤腐殖质的空间分布特征

沈永明^{1,2}, 杨劲松², 曾 华¹, 刘咏梅¹, 陈子玉¹

(1.南京晓庄学院地理科学学院, 江苏 南京 210017; 2.中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要:互花米草是从美国引进我国的适宜在海滩高潮带下部至中潮带上部广阔滩面上生长的耐盐耐淹植物,研究互花米草盐沼湿地土壤腐殖质的空间分布规律是了解外来物种互花米草对我国潮滩环境影响的重要方面。本文选择了 10 个地点,采集了 41 个土壤样品并进行了腐殖质含量测定,分析了互花米草盐沼湿地土壤腐殖质各指标沿垂直于海堤方向以及平行于海堤方向和地下剖面方向的空间分布特征,探讨了产生空间异质性的可能原因。结果表明,互花米草盐沼湿地土壤属于典型的富里酸性、在稳定海岸沿垂直于海堤方向一般表现为从海岸向外逐渐降低的趋势以及从表层向下腐殖质含量呈波状降低,但降低幅度一般较小。

关键词:互花米草;土壤;腐殖质;空间分布

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2279-06

The Spatial Distributing Characters of the Soil Humus in *Spartina alterniflora* loisel Salt Marsh

SHEN Yong-ming^{1,2}, YANG Jing-song², ZENG Hua¹, LIU Yong-mei¹, CHEN Zi-yu¹

(1.School of Geography Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210017, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The soil humus is the major part of the soil organic matter, and it is the major sign of the soil fertility. *Spartina alterniflora* loisel is an abextra species introduced into China from America which can occupy vast areas between mean sea level and mean high level. The soil humus affected by the salt-tolerant plants of the *Spartina alterniflora* has special character. Therefore, it is very important to study the spatial diversity of the soil humus in *Spartina alterniflora* loisel salt marsh. The paper collected 41 soil samples in 10 typical areas in *Spartina alterniflora* loisel salt marsh in Jiangsu province and Fujiang province, which include those collected from sea toward direction, parallel the sea wall direction and vertical direction, and the plants community character of the *Spartina alterniflora* loisel was investigated. Then the soil humus and the soil organic carbon contents were measured, and the spatial distributing characters of the soil humus and the possible reason were analyzed. The results show that the amount of the fulvic acids is more than that of the humic acids in *Spartina alterniflora* loisel salt marsh, that the humus content near the sea wall usually are more than that of the sea toward site in steadily coast, and that the soil humus content reduces flexuously from surface layer to the bottom layer with small extent duo to the long root of the *Spartina alterniflora* loisel.

Keywords: *Spartina alterniflora* loisel; soil; humus; distributing character

土壤腐殖质是土壤有机质的主体,对土壤的一系列性质和形态产生影响,其数量、组成和性质可以反映一定的成土条件和过程,是区分土壤类型的重要诊断指标之一,同时也是土壤肥力的主要标志^[1]。土壤腐殖质中含有多种疏水基、亲水基和游离基等官能团,

是土壤中对污染物的吸附-解吸过程中起主要作用的组分,另外土壤腐殖物质也是植物所需营养元素(如 N 和 P)的主要来源,是土壤肥力的重要组成部分,并可使土壤具有通气性、渗透性和缓冲性,同时土壤腐殖质也是全球碳平衡过程中非常重要的碳库^[2-3]。因此,土壤腐殖质的研究已成为土壤学、环境化学和地球化学等领域的热点方向之一。目前,国内有关森林、农田和草原土壤腐殖质含量及其组成特征的研究较多^[1,4-7],而关于外来物种互花米草盐沼湿地土壤的腐殖质研究少见报道,互花米草 (*Spartina alterniflora*

收稿日期:2008-01-08

基金项目:国家自然科学基金(40401059)

作者简介:沈永明(1970—),男,江苏灌南县人,博士,副教授,主要从事海洋与滩涂的开发利用及管理的教学与研究工作。

E-mail: yongmsh@163.com

loisel)是从美国引进我国的适宜在海滩高潮带下部至中潮带上部广阔滩面上生长的耐盐耐淹植物,目前,互花米草已广泛分布于我国大部分沿海省市的沿岸地区,形成了规模较大的互花米草人工盐沼^[8]。本文通过对互花米草盐沼湿地土壤腐殖质的分布特征的探讨,从而为进一步研究外来物种互花米草对我国潮滩环境的影响研究打下基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重点研究区选择在互花米草生长较好的江苏省东台市川水闸与梁垛河闸之间的笆斗垦区外的潮滩(见图1),最外侧海堤建于2002年围垦时。该区的互花米草始栽于1988年,栽种后扩展迅速,经过多次围垦,目前潮滩外还有南北长8 km、东西宽约1.5 km的互花米草盐沼滩地^[9]。从潮滩动力背景看,该区主要受由北向南传播的南黄海旋转潮波控制,潮差达4 m左右,属强潮流区控制区。滨外潮汐属正规半日潮,近岸则浅水分潮明显,沉积物粒径一般在 $\Phi 4.0\sim 6.0$ 之间,属淤长型淤泥质海岸;研究区南部的外侧隔死生港潮沟与辐射沙洲的条子泥沙洲相望,有规模巨大的辐射沙洲作屏障,因而波浪作用不强。从气候上看,该区夏季盛行东南风,冬季盛行偏北风,年均降水量800~1 200 mL,为暖温带向亚热带过渡的季风气候。互花米草盐沼湿地土壤主要为粉沙质和泥质潮滩沉积物经过盐沼植被等生物作用以及潮水周期性淹没而形成的土壤,土壤肥力等性质差异较大,本研究区的土壤一般呈碱性,pH值一般界于7.0~8.6之间,有机质



图1 重点研究区采样点

Figure 1 The main study area and sampling

含量一般在 $2\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间^[9,14]。

为了比较不同类型区互花米草的腐殖质空间异质性,本研究区还选择福建泉州海仓($24^{\circ}27'59''\text{N}$, $117^{\circ}57'18''\text{E}$)和江苏连云港连云区($34^{\circ}45'31''\text{N}$, $119^{\circ}19'47''\text{E}$),这些地方土壤一般也呈碱性,由于土壤形成时间较长,土壤肥力较高,有机质含量可达 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上。福建属于比较典型的亚热带季风气候区,采样地点是红树林和互花米草混生地,互花米草较为稀疏,采集了6、7、8号3个样品,分别离海堤5、30、50 m。江苏连云港属于暖温带季风气候区,互花米草受动力沉积条件影响,仅分布在靠近海堤狭长地带,宽度一般为200 m左右,分别在碱厂堤外和西墅养殖场堤外采集了9、10号样品。

1.2 样品的采集与分析

为了分析互花米草盐沼湿地土壤腐殖质的空间异质性,本研究分3个层面进行采样。一是在典型研究区选择垂直于海堤的一条断面,在断面3个不同高程位置上(3、4、5号点)采样(见图1);二是在平行于海堤的地点采样,除了上述断面样品以外,还在典型研究区的河口附近(1号点)和福建泉州(6、7、8号点)及江苏连云港碱厂附近(9号点)和西墅养殖场堤外(10号点)互花米草地进行表层土壤采样;三是海堤内外采样,在靠近3号点的海堤内侧(2号点)采集,以便于比较围垦前后的差异;四是在垂直地表面方向上采样,分别在上述的1~5号点进行分层采样,在每一点分别采集8层土壤样品,各层位置分别为离地表0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm、60~70 cm和70~80 cm处采样,其中2号点由于地下水位较高,仅采集上4层。

本研究共采集41个土壤样品,带回实验室进行风干等处理后,再进行磨碎,分别过20目和100目筛,最后进行腐殖质(富里酸、胡敏酸和胡敏素)和有机碳等研究项目的测定。土壤腐殖质分组采用焦磷酸钠-氢氧化钠溶液提取法,有机碳含量采用重铬酸钾氧化,外加热法测定^[10]。另外为了便于对腐殖质结果的分析,本文还对采样地点植被生长情况进行了调查。

2 研究结果

2.1 垂直于海堤断面方向的互花米草土壤腐殖质分布差异

分别在江苏东台(3、4、5号点)和福建厦门(6、7、8号点)采集了垂直于海堤断面方向的互花米草盐沼

湿地采集了 6 个样品,测定结果表明,各点的胡敏酸含量均是最低,富里酸较高,胡敏素最高,胡敏酸与富里酸之比均在 0.5 以下,均属于明显的富里酸型;在垂直于海堤方向的断面上,江苏与福建的各要素的变化情况略有不同,在江苏的 3、4、5 3 个点中,处于断面中间位置的 4 号点各指标含量均是最高,分别为 0.62、1.94 和 $6.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,两头的靠近海堤(3 号点)和距离海堤最远(5 号点)均较低,分别都在 0.36、1.25 和 $4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下;而厦门的断面上 6、7、8 3 个点中,仅胡敏酸含量表现为中间较高,为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,两头分别为 0.26 和 $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,富里酸和胡敏素均表现为从海堤向海降低的趋势,从海堤向海方向,富里酸分别为 3.12、2.31 和 $1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,胡敏素分别为 9.23、8.31 和 $7.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (见图 2),反映出江苏沿海的互花米草湿地与福建厦门的互花米草的较大差异性。

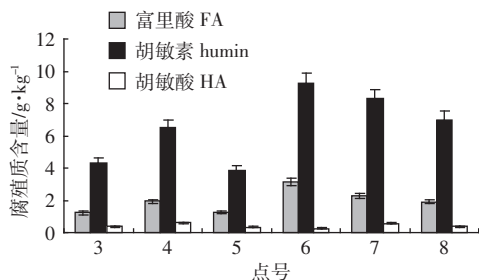


图 2 垂直于海堤方向土壤腐殖质含量

Figure 2 The humus content in different point from sea wall to sea direction

2.2 不同区域的互花米草土壤腐殖质分布差异

从南向北分别在福建厦门(6 号点)、江苏东台(1、3 号点)和江苏连云港(9、10 号点)采集了互花米草盐沼湿地土壤腐殖质的经向(平行于海堤的断面方向)上的 5 个样品,测定结果表明,各点的胡敏酸含量也均最低,富里酸略高一点,胡敏素也都最高;从各点的胡敏酸分布上来看,福建厦门和江苏东台比较接近,胡敏酸含量在 $0.26 \sim 0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,而江苏连云港的两个地点较明显地高于福建厦门和江苏东台地区的胡敏酸含量,两点都在 $1.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。而富里酸的分布则表现为福建厦门和江苏连云港都明显高于江苏东台的特征,其中福建厦门的富里酸含量为 $3.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,江苏连云港的为 2.89 和 $5.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而江苏东台的富里酸含量仅分别为 1.22 和 $1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;胡敏素的分布特征与富里酸比较相似,都是福建厦门和江苏连云港都明显高于江苏东台的特征,且程度比富里酸还要大,如福建厦门胡敏素含量

为 $9.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,江苏连云港为 12.32 和 $9.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,都明显高于江苏东台的 4.21 和 $4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。江苏东台的 1 号点和 3 号点腐殖质各要素都相当,无明显差异。

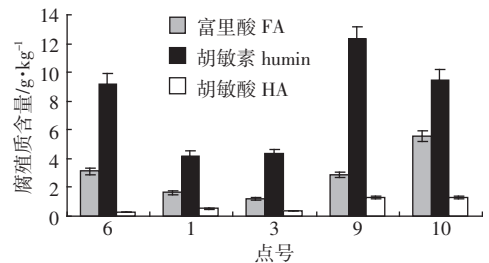


图 3 平行于海堤方向的土壤腐殖质分布

Figure 3 The humus content in different latitude point

2.3 海堤内外互花米草土壤腐殖质差异

在采集的样品中,2 号点和 3 号点的互花米草分别处于海堤内外两侧,从表层土壤来看,腐殖质各要素的测量结果基本相当,处于海堤内侧的 2 号点的富里酸、胡敏酸和胡敏素分别为 1.33、0.10 和 $3.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于海堤外侧互花米草土壤腐殖质各要素分别为 1.22、0.36 和 $4.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从垂直于地表的剖面来看,2 号点和 3 号点从表层向下至 40 cm 深基本上都表现为逐渐降低的趋势,但位于 2 号点 30 cm 深度处的胡敏素明显高于其他各点,该点胡敏素含量为 $3.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而表层仅为 $3.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;另外从这两点向下变化的拟合趋势直线的 R^2 来看,海堤外的 3 号点略高于海堤内的 2 号点,3 号点的 R^2 最高和最低分别为 0.760 和 0.374,而 2 号点分别为 0.737 和 0.100。

2.4 互花米草土壤腐殖质分布的垂向(竖直)差异

互花米草盐沼湿地土壤腐殖质在垂直方向上变化有一定的规律性,主要表现为腐殖质各要素总体上都是从表层向底层逐渐波动降低(见图 4),变化曲线拟合直线的斜率反映了下降的方向和速度,即胡敏素从土壤表层向下增加 10 cm 深度腐殖质各要素变化的数量。从结果来看,腐殖质各要素均为负值,但斜率绝对值一般都较小,富里酸平均下降 $0.075 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,胡敏酸平均下降 $0.042 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,胡敏素下降 $0.352 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (见表 1)。从表中还可以看出,腐殖质各要素的垂直变化都是呈波动降低的,其拟合趋势直线的 R^2 一般为 0.5 左右,其中最高的为 4 号点的胡敏素, R^2 达 0.812,最低的是 5 号点的富里酸, R^2 仅为 0.168(见表 1)。

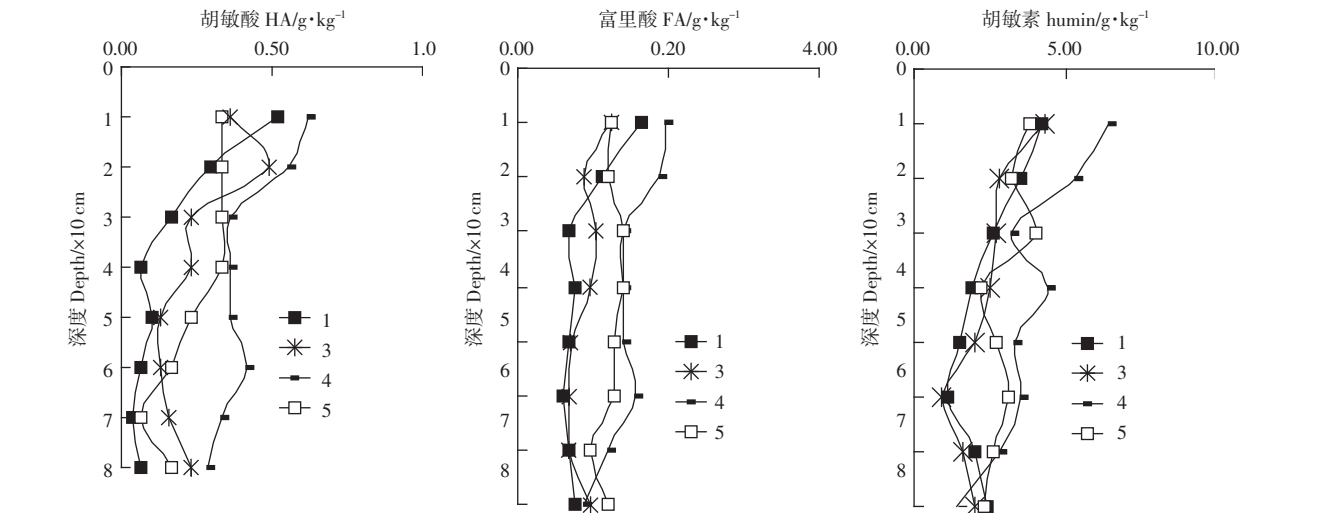


图 4 土壤腐殖质含量的垂向变化

Figure 4 The humus content from surface layer to bottom layer

表 1 腐殖质含量垂直变化拟合直线斜率及相关程度										
Table 1 The trend linear slope and the correlative degree of the vertical change of the humus content										
位置	1 号点		3 号点		4 号点		5 号点		平均	
趋势直线	斜率	R ²	斜率	R ²	斜率	R ²	斜率	R ²	斜率	R ²
富里酸 FA	-0.102	0.518	-0.050	0.412	-0.124	0.785	-0.022	0.168	-0.075	0.471
胡敏酸 HA	-0.057	0.690	-0.035	0.485	-0.039	0.674	-0.037	0.761	-0.042	0.653
胡敏素 humin	-0.297	0.488	-0.338	0.676	-0.577	0.812	-0.194	0.482	-0.352	0.615

3 讨论

3.1 土壤腐殖质含量与植被生长状况等环境条件的关系

从垂直于海堤方向的变化来看,江苏沿海的互花米草从海堤向海断面方向的腐殖质变化受互花米草的生长状况影响很大。经过对 3、4 和 5 号点的地上生物量调查,结果表明最外侧的 5 号点互花米草生物量最高,地上干生物量 828 g·m⁻²,4 号点次之,为 604 g·m⁻²,3 号点最低,为 589 g·m⁻²。但腐殖质却是 4 号点最高。这是由于腐殖质一方面受生物量的影响,生物量高腐殖质含量也高,一方面也与植被的作用时间有关。5 号点虽然生物量最高,但该处的互花米草生长时间相对较短,因而腐殖质含量并不是最高。而处在中间位置的 4 号点生物量较大,互花米草作用时间也相对较长,因而腐殖质各要素均最高,反映江苏东台淤长性海岸的特性。对于福建厦门的 6、7 和 8 号点,由于该处属于红树林和互花米草混生地带,虽然在腐殖质含量上明显区别于江苏东台地区,但也有明显的垂直于海堤方向的变化,并且其中的富里酸和胡敏素

两项指标严格按照从靠近海堤向远离海堤方向降低,这与该地区海岸比较稳定有关。

从不同地区的差异来看,江苏东台地区的互花米草盐沼湿地土壤腐殖质含量一般远低于福建厦门地区和江苏连云港地区,这主要是由于江苏东台采样点的互花米草生长时间相对较短所致。江苏东台与江苏连云港以及福建厦门同属于海岸盐沼湿地,淹水及土壤化过程相似,但由于江苏东台属于淤长型海岸,潮滩不断向外淤长,互花米草也不断向外扩展^[9],靠近海堤的互花米草盐沼也就不不断被围垦,采样点附近的海堤也是在 2002 年才建成的,这就是说江苏的互花米草盐沼湿地采集的土壤样品受互花米草作用时间相对较短,土壤化作用相对较弱,腐殖质含量相应较低;而江苏连云港和福建厦门海仓附近的海岸相对稳定^[9,12],互花米草和红树林虽然宽度有限,但却相对稳定,采样点土壤是经过相对长期的生物作用才形成的,土壤化过程显著,因此土壤腐殖质含量相应较高。

3.2 土壤腐殖质含量与土壤有机碳含量的关系

土壤腐殖质是土壤有机质的主体,对土壤的一系列性质和形态产生影响,其数量、组成和性质可以反

映一定的成土条件和过程。土壤腐殖质中含有多种疏水基、亲水基和游离基等官能团,是土壤中对污染物的吸附-解吸过程中起主要作用的组分^[1]。因此,土壤腐殖质的含量与土壤有机碳含量之间有密切的关系。经过对互花米草盐沼湿地各地点有机碳含量和腐殖质含量的相关系数可以看出(表 2),腐殖质的富里酸、胡敏酸和胡敏素 3 个指标均与有机碳存在显著的相关性,其中胡敏素与有机碳的含量最高,富里酸次之,胡敏酸最低,这可能是由于互花米草盐沼湿地土壤都长期处于厌氧和渍水环境条件下,对土壤的腐殖化过程产生了较大的阻碍作用,加上温度高,矿物风化作用强烈,因腐殖质各指标的分子结构特点不同,合成的胡敏酸量少,但却有利于胡敏素和富里酸的形成和积累^[1],因而使得胡敏素和富里酸与有机碳的含量关系更为密切。互花米草盐沼湿地土壤的胡敏酸与富里酸之比均在 0.5 以下,都属于富里酸型,其内在机理还有待于进一步的研究。

3.3 土壤腐殖质含量在垂直地表方向的变化反映了互花米草的根系特点

土壤腐殖质含量的垂直变化一般都表现为从表层向下逐渐降低的特征,但受不同植被类型的根系长度影响而表现出不同的特征^[13]。互花米草根系发达,根系长度有的长达 1 m 左右^[14],而腐殖质的形成与根系提供的物质来源密切相关,因此互花米草盐沼湿地土壤从表层向下的降低幅度较低,表现为变化趋势的拟合直线的斜率的绝对值均较小,并且直至地表下 80 cm 深处的土壤仍有一定量的腐殖质。在腐殖质各要素从表层向下波状降低的变化曲线与趋势拟合直线的相关程度反映了腐殖质指标的受干扰程度。从上述分析的特点来看,互花米草盐沼湿地腐殖质变化从表层向下表现出较大的不稳定性,这可能与互花米草湿地有大量土壤动物及微生物作用有关。在腐殖质 3 个指标中,胡敏素从表层向下变化梯度最大,可见其受互花米草地上植株生物量的影响最直接,这与上面讨论的胡敏素含量与有机碳含量相关性最大是一致

的,即由表层向下受植被的影响越来越小,有机碳含量相应降低,因此胡敏素也作相似的降低。

4 结论

(1)互花米草盐沼湿地土壤沿垂直于海堤方向的断面上,腐殖质各指标含量在比较稳定的海岸带一般表现为从海岸向外逐渐降低的趋势,而在淤长型的海岸此种特征不明显,含量高低除与生长年限有关,还受植被生长状况等因素影响。在淤长型海岸新围海堤附近,腐殖质含量远低于稳定海岸附近含量。

(2)互花米草盐沼湿地土壤腐殖质含量与有机碳含量显著相关,其中胡敏素与有机碳含量的相关程度最高,富里酸次之,胡敏酸最低。胡敏酸与富里酸之比一般在 0.5 以下,属于典型的富里酸性土壤。

(3)在围垦海堤的内外两侧都有互花米草生长,土壤腐殖质含量比较接近,但靠近海堤内侧因受人为扰动明显,其垂直向下变化规律性较差。

(4)互花米草盐沼湿地土壤从表层向下腐殖质含量逐渐波状降低,但降低幅度一般较小,深度 10 cm,富里酸平均下降 0.075 g·kg⁻¹,胡敏酸平均下降0.042 g·kg⁻¹,胡敏素下降 0.352 g·kg⁻¹。其下降趋势拟合直线的 R² 变化幅度较大,反映出一定的不稳定性。

参考文献:

[1] 张晋京, 窦 森, 李翠兰, 等. 土壤腐殖质分组研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 706-709.
ZHANG Jin-jing, DOU Sen, LI Cui-lan, et al. Studies on fractionation of soil humus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 706-709.
[2] 李克斌, 许中坚, 刘维屏, 等. 农药在土壤上吸着/解吸及其对生物利用率影响的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 2(3): 18-24.
LI Ke-bin, XU Zhong-jian, LIU Wei-ping, et al. Sorption and desorption of pesticides on/from soil and the effect of that on bioavailability[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 2(3): 18-24.
[3] 党 志, 黄伟林. 环境有机地球化学: 有机污染物-土壤/沉积物吸附

表 2 土壤腐殖质含量与土壤有机碳含量的关系											
Table 2 The relationship between the humus content and the organic carbon in soil											
点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	与有机碳的相关系数
有机碳	6.35	4.87	5.92	9.05	5.44	12.61	11.17	9.27	16.48	16.38	
富里酸	1.62	1.33	1.22	1.94	1.25	3.12	2.31	1.92	2.89	5.55	0.859 0*
胡敏酸	0.52	0.10	0.36	0.62	0.33	0.26	0.56	0.36	1.27	1.34	0.820 9**
胡敏素	4.21	3.43	4.34	6.49	3.86	9.23	8.31	7.00	12.32	9.49	0.967 5*

注: * 在 α=0.001 水平上显著, ** 在 α=0.01 的水平上显著。

- 作用研究的回顾[J]. 岩石矿物地球化学通报, 1999, 18(3):194–200.
- DANG Zhi, HUANG Wei-lin. Organic geochemistry of environment: The review of the study on organic contamination – soil/sediment adsorption[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1999, 18(3):194–200.
- [4] 刘淑霞, 刘景双, 赵兰坡, 等. 吉林省主要耕作土壤中结合态腐殖质组成特征的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(1):72–76.
- LIU Shu-xia, LIU Jing-shuang, ZHAO Lan-po, et al. A study on the composition characters of combined humus in cultivated soils of Jilin province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2002, 24(1):72–76.
- [5] 宿庆瑞, 迟凤琴. 黑龙江省几种主要土壤结合态腐殖质特性的研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(5):215–216.
- XIU Qing-Rui, CHI Feng-qin. The study on the characters of the several main combine state soil humus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, 28(5):215–216.
- [6] 裴海昆, 朱志红, 乔有明, 等. 不同草甸植被类型下土壤腐殖质及有机磷类型探讨[J]. 草业学报, 2001, 10(4):18–23.
- PEI Hai-kun, ZHU Zhi-hong, QIAO You-ming, et al. Humus in soil and type of organic phosphorus of soil on different alpine meadow vegetation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(4):18–23.
- [7] 李忠佩, 程励励, 林心雄, 等. 红壤腐殖质组成变化特点及其与肥力演变的关系[J]. 土壤, 2002, 1:9–15.
- LI Zhong-pei, CHENG Li-li, LIN Xin-xiong, et al. The characters of the constitutes and transformation of red soil humus and the connection with the soil fertility evolvement[J]. *Soil Science*, 2002, 1:9–15.
- [8] 张忍顺, 沈永明, 陆丽云, 等. 江苏沿海互花米草盐沼的形成过程[J]. 海洋湖沼, 2005, 36(4):358–366.
- ZHANG Ren-shun, SHEN Yong-ming, LU Li-yun, et al. Formation of *Spartina alterniflora* salt marsh on Jiangsu coast, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(4):358–366.
- [9] 任美镔, 许廷官, 朱季文, 等. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查[M]. 北京:海洋出版社, 1985. 1, 25–46, 110–120.
- REN Mei-e, XU Ting-guan, ZHU Ji-wen, et al. Colligate investigate report about coastal zone in Jiangsu Province[M]. Beijing:Ocean Press, 1985. 1, 25–46, 110–120.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科技出版社, 1978. 136.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical chemistry analysis[M]. Shanghai:Shanghai science and technology press, 1978. 136.
- [11] 何 斌, 温远光, 刘世荣, 等. 英罗港不同红树植物群落土壤腐殖质组成及特性的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):517–520.
- HE Bin, WEN Yuan-guang, LIU Shi-rong, et al. Composition and properties of soil humus of different mangrove communities in Yingluo bay of Guangxi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):517–520.
- [12] 黄建辉, 林光辉, 韩兴国, 等. 不同生境红树科植物水分利用效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4):530–536.
- HUANG Jian-hui, LIN Guang-hui, HAN Xing-guo, et al. Comparative studies on water use efficiency of *rhizophoraceae* plants grown in different environments[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4):530–536.
- [13] 杨继松, 于君宝, 刘景双, 等. 三江平原典型湿地土壤腐殖质的剖面分布及其组成特征[J]. 土壤通报, 2006, 37(5):865–868.
- YANG Ji-song, YU Jun-bao, LIU Jing-shuang, et al. Humus distribution and fraction of typical marsh soildepth profiles in the Sanjiang plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5):865–868.
- [14] 沈永明, 曾 华, 王 辉, 等. 江苏典型淤长岸段潮滩盐生植被及其土壤肥力特征[J]. 生态学报, 2005, 25(1):1–6.
- SHEN Yong-ming, ZENG Hua, WANG Hui, et al. Characteristics of halophyte and associated soil along aggradational muddy coasts in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1):1–6.
- 致谢:刘钦普教授对论文英文摘要进行了精心修改,特表谢忱!