

# 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系\*

马玉蕾<sup>1,2</sup> 王德<sup>2</sup> 刘俊民<sup>1\*\*</sup> 温小虎<sup>2</sup> 高猛<sup>2</sup> 邵宏波<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

**摘要** 土壤盐分和地下水埋深是影响黄河三角洲植被发育和分布的重要因素。本文通过野外调查与统计分析, 研究了黄河三角洲区域典型植被(翅碱蓬-柽柳、刺槐、芦苇和棉花)、地下水埋深、土壤盐分之间的关系。结果表明: 研究区地下水埋深显著影响土壤盐分, 平均影响系数为0.327, 地下水埋深在0.5~1.5 m的土壤盐渍化最严重; 整个研究区内植被发育较差, 其中, 研究区78%面积的归一化植被指数(NDVI)<0.4, 地下水埋深、土壤盐分对天然植被分布有显著影响; 土壤盐分对研究区翅碱蓬-柽柳、刺槐、芦苇及棉花NDVI的影响显著, 地下水埋深对翅碱蓬-柽柳NDVI的影响显著, 对芦苇、棉花、刺槐NDVI的影响不显著。

**关键词** 黄河三角洲 地下水埋深 土壤盐分 植被发育 归一化植被指数

**文章编号** 1001-9332(2013)09-2423-08 **中图分类号** P641; Q948 **文献标识码** A

**Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the Yellow River Delta of China.** MA Yu-lei<sup>1,2</sup>, WANG De<sup>2</sup>, LIU Jun-min<sup>1</sup>, WEN Xiao-hu<sup>2</sup>, GAO Meng<sup>2</sup>, SHAO Hong-bo<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2423–2430.

**Abstract:** Soil salinity and groundwater depth are the two important factors affecting the vegetation growth and distribution in the Yellow River Delta. Through field investigation and statistical analysis, this paper studied the relationships between the typical vegetations (*Suaeda heteroptera-Tamarix chinensis*, *Robinia pseudoacacia*, *Phragmites australis*, and cotton), soil salinity, and groundwater depth in the Delta. In the study area, groundwater depth had significant effects on soil salinity, with the average influence coefficient being 0.327. When the groundwater depth was 0.5–1.5 m, soil salinization was most severe. The vegetation growth in the Delta was poorer, with the NDVI in 78% of the total area being less than 0.4. Groundwater depth and soil salinity had significant effects on the vegetation distribution. Soil salinity had significant effects on the NDVI of *R. pseudoacacia*, *S. heteroptera-T. chinensis*, *P. australis*, and cotton, while groundwater depth had significant effects on the NDVI of *S. heteroptera-T. chinensis*, but lesser effects on the NDVI of *P. australis*, cotton and *R. pseudoacacia*.

**Key words:** Yellow River Delta; groundwater depth; soil salinity; vegetation growth; NDVI.

湿地是水-陆系统相互作用形成的独特生态系统, 对全球变化与人类活动的影响具有高度敏感性和脆弱性。目前, 由于气候变化和人类活动, 导致大面积的湿地退化和盐渍化, 对湿地生态系统的稳定和健康造成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。黄河三角洲湿地也出现

了天然湿地面积减小、土壤盐渍化程度加重、湿地生态功能退化、湿地多样性水平下降等问题<sup>[3]</sup>。这些问题都与湿地植被息息相关。由于黄河三角洲是环渤海重要的滨海湿地, 其植被生长主要受土壤盐分和地下水埋深的双重影响<sup>[4]</sup>。因此, 研究植被发育及植被分布与地下水埋深、土壤盐分的定量关系, 对黄河三角洲生态系统的保护和恢复具有重要意义。

国内一些学者对黄河三角洲的地下水、土壤盐分、植被群落开展了一系列研究。主要针对黄河三角

\* 国家自然科学基金项目(41001360)和环保部重大项目(STSN-11-01)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: 41888392@qq.com

2012-12-23 收稿, 2013-07-04 接受。

洲土壤盐渍化特征研究<sup>[5-8]</sup>、植被群落与地下水关系的研究<sup>[9-11]</sup>、植被群落与土壤盐分关系的研究<sup>[12-13]</sup>。这些研究多关注黄河三角洲土壤盐分特征、地下水位特征或其中之一与植被的关系,而对植被与土壤盐分、地下水埋深之间的定量关系研究较少。本文运用统计分析、典范相关分析,对研究区地下水埋深与土壤盐分的关系、典型植被发育和分布与地下水埋深、土壤盐分的定量关系进行分析,以期为研究区的生态系统恢复提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲( $37^{\circ}35'$ — $38^{\circ}12'$  N,  $118^{\circ}33'$ — $119^{\circ}20'$  E)是1855年黄河于河南省铜瓦厢决口北夺大清河道注入渤海后冲积而成的三角洲,隶属于我国山东省东营市(图1)。整个黄河三角洲区南高北低,呈山前平原-冲积平原-三角洲上部平原-三角洲下部平原(海岸带)-水下三角洲(水下岸坡)<sup>[14]</sup>。在南部高地、沿黄河及其故道的河成高地,土壤含盐量较低;而背河洼地与滩涂地的土壤含盐量较高。区内地貌类型包括河成高地(包括各期河道河床、边滩,以及天然堤和决口扇)和泛滥平原、洼地<sup>[15]</sup>。

该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,四季分明。年均气温12.8℃,无霜期200 d以上,年降雨量530~630 mm,降水主要集中在6—8月,占全年降雨的75%,年蒸发量1900~2400 mm。区内地下水普遍埋藏较浅且矿化度高,地下水分布规律为沿黄河河道附近地下水埋深较深,滨海及河间洼地为地下水浅埋区<sup>[16]</sup>,浅层淡水资源主要分布在小清河以南地区,多年平均浅层地下水储量为 $8.63 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,现状实际开采地下水 $8.869 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,已接近饱和状态<sup>[17]</sup>。该区地下水主要为微咸水、咸水、卤水及一些地下淡水透镜体,河积粉砂和潮汐沉积物为地下水赋存介质<sup>[18]</sup>。地下水矿化度在6—8月(当地旱季和雨季交替时)变化最大<sup>[19]</sup>。土壤类型主要为潮土、盐化潮土以及滨海潮盐土;土壤质地以轻壤、砂壤为主,还有小面积的粘土、重壤;岩性主要由粉砂、粘土质粉砂和粘土组成。黄河三角洲这些特殊的沉积环境、气候条件和土壤母质决定了原生盐渍化土壤在区域内广泛分布<sup>[6]</sup>,70%以上的土地发生了不同程度的盐碱化<sup>[20]</sup>。区内自然植被多为耐盐的草本植物和灌木成分,尤以滨海盐生或耐盐生草甸植被占显著地位,群落优势种主要有芦苇(*Phragmites australis*)、翅碱蓬

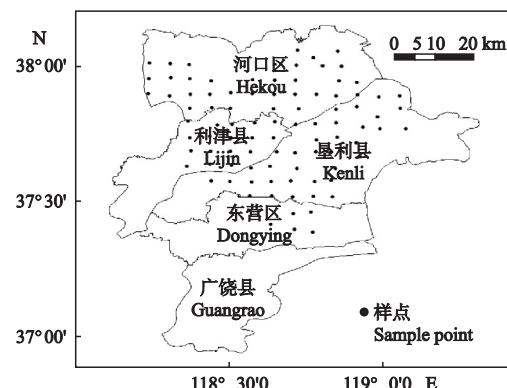


图1 研究区位置和样点分布示意图

**Fig. 1** Sketch map of the study area location and the sampling points distribution.

(*Suaeda heteroptera*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、杞柳(*Salix integra*)等<sup>[21]</sup>。

### 1.2 取样及数据收集

2003年10月7—8日的土壤含盐量数据和地下水埋深数据来自地球系统科学数据共享网数据(<http://www.geodata.cn>)。当地10月中下旬属旱季,地下水埋深受降雨和人为因素的影响均较小,但地下水埋深对土壤盐渍化的影响较大。在区域采集土壤样品94个,为了取得不同尺度的观测值并兼顾大、中、小尺度土壤盐分的空间变异,样点呈6 km×6 km的网格分布。由于研究区内地下水埋深较浅,每个样点用铁铲挖至地下水流出,待水位稳定后测量地下水埋深,同时进行30~40 cm土壤样品采集,用GPS确定样点地理位置(经、纬度)(图1),记录样点周围出现的植物物种。土壤盐分样品测试在室内进行。将样品在室内风干并粉碎,过1 mm筛;选择水土比5:1浸提,用双指示剂中和法测定CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,用AgNO<sub>3</sub>滴定法测定Cl<sup>-</sup>;EDTA间接滴定法测定SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;EDTA络合滴定法测定Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>;差减法测定K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>;全盐量等于8个离子含量之和。物种总样本数为94个,其中,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、翅碱蓬-柽柳、芦苇和棉花地样本数分别为6、38、25和25个。

归一化植被指数(NDVI)是目前广泛采用的反映植被生长状况的指数,NDVI值大说明植被发育状况良好,NDVI值小说明植被发育较差。本研究所采用的MODIS NDVI数据的空间分辨率为250 m,源自国际科学数据服务平台,为了与地下水位、土壤盐分数据时间相对应,选用2003年10月16日的MODIS NDVI数据。

### 1.3 数据处理

本研究运用的统计方法主要有信息量统计分析、多元回归分析和典范相关分析。

信息量统计分析用于分析区域地下水埋深与30~40 cm 土层土壤全盐量之间的关系。其原理是根据地下水埋深与30~40 cm 土层盐分状态的统计规律,将土壤全盐量作为研究区盐分运动变化发出的一种信息,依据信息理论进行信息处理<sup>[22]</sup>。把每个地下水埋深段看作一个事件,不同含盐量段表示该事件的不同状态。 $P(X)$ 表示全盐量出现在含盐量段的概率。每个含盐量段包含的信息量为: $I(X) = -\log_2 P(X_i)$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) ;则该事件的平均信息量为: $H_j(X) = \sum_{i=1}^n P(X_i) I(X_i)$  ( $j=1,2,\dots; i=1,2,\dots$ )。

本文将研究区0.2~3.3 m 地下水埋深划分为<0.5 m、0.5~1.0 m、1.0~1.5 m、1.5~2.0 m、2.0~2.5 m、>2.5 m,分别用 $j=1,2,\dots,6$  表示, $j=7$  表示整个地下水埋深范围在0.2~3.3 m。将30~40 cm 土层的土壤全盐量划分为5个含盐量段,用变量 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  分别表示全盐量<0.3%、0.3%~0.5%、0.5%~1.0%、1.0%~2.0%、>2.0%。据此计算出 $H_j(X)$ 。地下水埋深对土壤盐分的影响作用系数 $\beta$ 为: $\beta = [H_7(X) - H_j(X)] / H_7(X), 0 < \beta < 1$ 。

采用SPSS统计分析软件,以NDVI( $Y$ )为因变量,土壤全盐量和地下水埋深为自变量,建立二元回归模型:

$$Y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

式中: $x_1, x_2$  分别表示地下水埋深和土壤全盐量; $b_1, b_2$  均为回归系数。

采用典范相关分析(CCA)对植被分布与地下水埋深、土壤全盐量的关系进行分析,采用Monte Carlo 随机置换检验进行排序的显著性检验。排序的物种数据矩阵为94×5(样方×物种),环境矩阵为94×2(样方环×境因子)。分别以每个环境因子的典范

特征值与所有特征值之和的比值来衡量该环境因子对物种分布的影响强度<sup>[23]</sup>。CCA 分析在Canoco 软件中实现。

以地下水埋深和土壤含盐量作为约束变量,分析其与不同植被类型NDVI 的关系。影响地下水埋深变化的因素主要有降水、蒸发和人为因素。除10月19日晚有小雨外,采样时间段内无雨,地下水埋深受降雨的影响很小;此时段属秋收季节,气温低,蒸发对地下水埋深的影响不大,人为因素对地下水埋深影响也较小。综上,地下水位在此时段内变化不大,其短时动态特性可忽略不计。

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水埋深对土壤全盐量影响的统计学分析

由表1可以看出,研究区非盐化土壤点位概率为35.1%,盐化土壤点位的概率为64.9%。54%的点位地下水埋深在0.5~1.5 m,此处的土壤盐化点位占全部盐化点位的74.5%。0.2~2.0 m 的地下水埋深范围内都可以发生轻中强盐渍化,其中,地下水埋深0.5~1.0 m 可产生盐土。地下水埋深>2.5 m 处没有盐渍化威胁。埋深在0.5~1.5 m,发生中度以上盐渍化土的可能性最大。根据发生中度以上盐渍化的概率对地下水埋深进行划分(表2):地下水埋深0.5~1.5 m 属于强盐化深度,土壤盐渍化最严重;地下水埋深0~0.5 m 属盐化深度,土壤盐渍化较严重。

地下水埋深直接关系到土壤毛细水能否到达地表,从而导致土壤积盐,同时在一定程度上决定着土壤积盐程度<sup>[24]</sup>。为评价地下水埋深对土壤盐分的影响,计算对比不同埋深的信息量的变化,以区别不同地下水埋深对土壤盐分信息量的影响情况。地下水埋深对土壤全盐量的平均作用系数为0.327,在不同埋深段对土壤盐分的影响作用不同(表2)。当地下水埋深<0.5 m 时,地下水埋深对土壤全盐量的作

表1 地下水埋深与土壤全盐量(S)点位数目统计

Table 1 Statistics of groundwater depth and sample numbers of soil salt content (S)

地下水埋深 Groundwater depth (m)	非盐渍土 Non-saline soil (S<0.3)	轻盐渍土 Mild saline soil (S=0.3~0.5)	中盐渍土 Medium saline soil (S=0.5~1.0)	强盐渍土 Severe saline soil (S=1.0~2.0)	盐土 Saline soil (S>2.0)	合计 Total
<0.5	1	5	3	0	0	9
0.5~1.0	7	5	5	8	2	27
1.0~1.5	6	5	7	6	0	24
1.5~2.0	17	3	3	5	0	28
2.0~2.5	0	2	0	2	0	4
>2.5	2	0	0	0	0	2

表 2 不同地下水埋深段和不同土壤盐分段的概率、信息量、地下水埋深作用系数

Table 2 Probability, information, function coefficient of groundwater depth in different groundwater depths and soil salinity

特征深度 Characteristic depth	地下水埋深 Groundwater depth (m)	30~40 cm 土层土壤含盐量的概率 Probability of soil salt content in soil layer of 30~40 cm (%)					信息量 Information [ $H_i(X)$ ]	地下水埋深 作用系数 Function coefficient of groundwater depth
		<0.3	>0.3	>0.5	>1.0	>2.0		
盐化 Salinization	<0.5	11.1	88.9	33.3	0	0	1.031	0.502
强盐化 Severe salinization	0.5~1.0	25.8	74.1	55.6	37	7.4	2.104	-0.015
	1.0~1.5	25	75	54.2	25	0	1.803	0.130
弱盐化 Mild salinization	1.5~2.0	60.7	39.3	28.6	19.7	0	1.927	0.069
	2.0~2.5	50	25	25	0	0	1.5	0.276
无盐化 Non-salinization	>2.5	1	0	0	0	0	0	1
地下水埋深 Range of groundwater depth	0.2~3.3	35.1	64.9	43.6	24.5	2.1	2.072	0.327

用系数值较大,表明在这个埋深范围内,地下水不但参与表层土壤积盐,而且对土壤积盐程度的影响较大。这是因为研究区地下水矿化度高,当地下水位在此埋深范围内时,地下水中的盐分通过毛细管作用上升至表层,在蒸发的作用下,致使土壤积盐。地下水埋深在0.5~2.5 m时,地下水埋深对土壤全盐量的作用系数值较小,地下水虽然参与土壤积盐,但对积盐程度影响较小。因为在此埋深范围内,一方面地下水矿化度随着地下水埋深的下降,对土壤积盐影响减弱;另一方面,土壤盐源分布对该土层积盐影响强度最大,其次是盐分离子组成化学特征,土层理化属性和地下水状况的直接影响强度较弱<sup>[25]</sup>。地下水埋深>2.5 m时,地下水埋深对表层土壤盐分影响减弱。这是由于土壤毛管上升最大高度分布在1.5~2.0 m<sup>[26]</sup>,因而地下水不能沿土壤毛管到达地表而使土壤积盐,表明当地下水不参与土壤积盐时,土壤盐渍化较轻。

综上,由于研究区地下水埋深浅、地下水矿化度高,土壤质地以粉砂质土为主,对盐分的吸附性能较大等因素的共同作用,致使研究区土壤大面积盐渍化。地下水矿化度对土壤积盐的影响随着地下水埋深的下降而减弱,所以研究区土壤的盐渍化与地下水埋深密切相关,地下水埋深越浅、土壤盐渍化程度越严重。

## 2.2 植被分布与地下水埋深、土壤盐分的关系

将研究区典型植被(翅碱蓬、柽柳、刺槐、芦苇和棉花)与地下水埋深、土壤全盐量这2个环境因子进行典范相关分析。由CCA排序、Monte Carlo检验表明,所有典范轴均极显著( $P<0.01$ )。CCA前2轴累计解释了物种-环境关系的100% (表3),说明CCA前2轴已能很好地反映物种-环境关系,即地下

水埋深和土壤盐分显著影响植被分布。两个环境因子中,地下水埋深与CCA第2轴呈显著正相关,土壤全盐量与CCA第1轴呈显著正相关。这些说明排序轴能较好地体现环境梯度。

地下水埋深沿CCA第2轴由下向上增加,土壤全盐量沿CCA第1轴由左向右增加(图2)。翅碱蓬、柽柳、芦苇位于排序图的中间,说明这3种植被分布在地下水埋深较浅和土壤含盐量中等的地方;且翅碱蓬、柽柳受地下水埋深的影响显著高于芦苇。刺槐分布在地下水埋深较深、土壤盐分较低的地方,出现这种结果的原因:一是刺槐都是人工林,栽种之初为了考虑刺槐的成活率,选择在地形较高、地下水埋藏较深、土壤盐分含量较低、离黄河距离较近、灌溉条件较好的地方;二是刺槐可以促进土壤脱盐,

表 3 环境因子与CCA排序轴的相关系数及排序概要

Table 3 Correlation coefficients between environmental factors and CCA ordination axes and ordination summary

环境因子 Environmental factor	第1轴 Axis 1	第2轴 Axis 2	第3轴 Axis 3	第4轴 Axis 4
地下水埋深 Groundwater depth	-0.15	0.51	0	0
土壤全盐量 Soil salt content	0.61	0.13	0	0
CCA排序概要 Summary of CCA ordination				
特征值 Eigenvalue	0.37	0.25	0.99	0.71
物种-环境相关系数 Species-environment correlation coefficient	0.63	0.52	0	0
物种-环境的方差累积比例 Cumulative percentage variance of species-environment relations (%)	59.2	100	0	0
所有典范轴的显著性检验 Test of significance of all canonical axes	0.002			

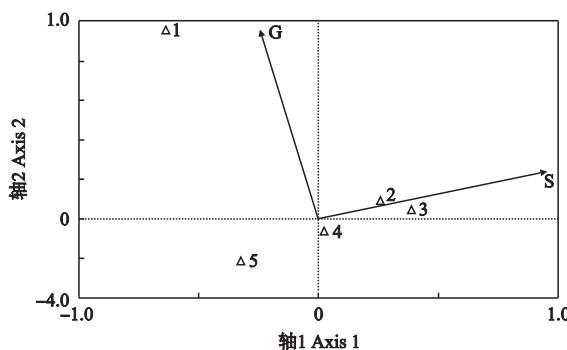


图2 物种和环境因子的CCA双序图

Fig. 2 CCA biplot of species and environmental factors.

1) 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; 2) 翅碱蓬 *Suaeda heteroptera*; 3) 桤柳 *Tamarix chinensis*; 4) 芦苇 *Phragmites australis*; 5) 棉花 Cotton. S: 土壤含盐量 Soil salt content; G: 地下水埋深 Groundwater depth.

提高土壤肥力<sup>[25]</sup>. 棉花主要分布在地下水埋深较浅、土壤盐分较低的地方, 但其生长环境受人类影响很大, 如灌溉、施肥、人工填土等。

### 2.3 植被发育与地下水埋深和土壤盐分的关系

根据2003年10月MODIS NDVI数据, 绘制出MODIS NDVI空间分布图(图3). 从中可以看出, 只有27%的面积NDVI>0.4, 剩余78%的面积NDVI小于0.4, 标志着研究区大部分地段植被发育较差。在植被发育较差的78%的面积中, 9%为滩涂地、城镇, 无植被生长; 19%为河滩地、低洼地。

对不同植被类型的NDVI、土壤全盐量和地下水埋深进行多元回归分析, 分别建立翅碱蓬-柽柳群落( $Y_1$ )、刺槐( $Y_2$ )、棉花( $Y_3$ )、芦苇( $Y_4$ )NDVI的估计方程:

$$Y_1 = 0.147 - 0.108x_1 - 0.184x_2$$

$$Y_2 = 0.470 + 0.802x_1 + 0.855x_2$$

$$Y_3 = 0.510 - 0.025x_1 - 0.254x_2$$

表4 不同植被类型NDVI的多元回归分析结果

Table 4 Result of multivariate regression analysis of the different vegetation types NDVI

植被类型 Vegetation type	模型 Model	回归系数 Regression coefficient	标准差 Standard deviation	标准化回归系数 Standardization regression coefficient	T检验 T test	检验概率 Probability of test	其他统计检验 Other statistic test
翅碱蓬、柽柳 <i>S. heteroptera-T. chinensis</i>	I	0.584	0.310		19.054	0.000	$R^2 = 0.672$
	II	-0.108	0.210	-0.475	-5.177	0.000	$F = 39.73, \text{Sig} = 0.000$
	III	-0.184	0.260	-0.650	-7.088	0.000	
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	I	0.147	0.124		1.178	0.324	$R^2 = 0.853$
	II	0.802	0.041	0.453	1.976	0.143	$F = 8.672, \text{Sig} = 0.057$
	III	0.855	0.211	0.928	4.047	0.027	
棉花 Cotton	I	0.510	0.036		14.066	0.000	$R^2 = 0.520$
	II	-0.025	0.033	-0.108	-0.772	0.445	$F = 7.212, \text{Sig} = 0.002$
	III	-0.254	0.073	-0.488	-3.499	0.001	
芦苇 <i>P. australis</i>	I	0.536	0.058		9.233	0.000	$R^2 = 0.417$
	II	0.017	0.039	0.071	0.434	0.068	$F = 7.868, \text{Sig} = 0.003$
	III	-0.284	0.072	-0.652	-3.965	0.001	

I: 常数 Constant; II: 地下水埋深 Groundwater depth; III: 含盐量 Soil salt content.

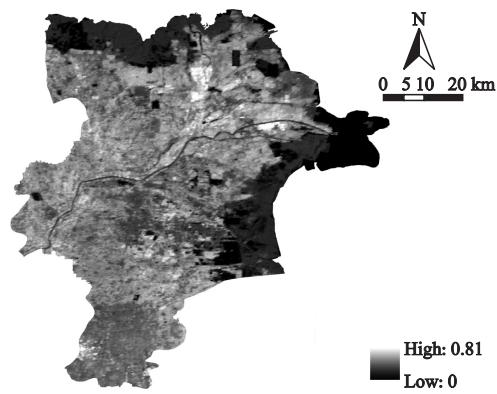


图3 黄河三角洲2003年10月MODIS NDVI空间分布图

Fig. 3 MODIS NDVI spatial distribution map of the Yellow River Delta in October, 2003.

$$Y_4 = 0.536 + 0.017x_1 - 0.840x_2$$

式中: $x_1$ 、 $x_2$  分别表示地下水埋深和土壤全盐量。

从表4可以看出, 翅碱蓬、柽柳群落的判定系数( $R^2$ )为0.672, 拟合优度较理想; 其F统计量的相伴概率值为0.000, 表明得出的回归方程显著有效; 两个自变量的回归系数假设检验概率值都为0.000, 表明对方程有显著作用, 即土壤全盐量和地下水埋深对碱蓬、柽柳的NDVI有显著影响。

刺槐的 $R^2$ 为0.853, 拟合优度较理想。其F统计量的相伴概率值为0.057, 表明所得回归方程的效果不显著; 常数项为0.147, 效果不显著; 土壤全盐量回归系数假设检验概率值为0.027, 表明对方程有显著作用, 即土壤全盐量对刺槐NDVI有显著影响; 地下水埋深回归系数假设检验概率值为0.143, 其对回归方程的影响不显著, 可能原因是刺槐林栽种区的土壤肥沃、有机质含量高, 但由于黄河来水偏少, 海潮的顶托作用相对增大, 引起海水入

侵,使地下水矿化度增加<sup>[27]</sup>,当刺槐的根生长到接近于地下水位埋深时,会出现枯死,从而导致地下水埋深对植被生长的影响不显著。

棉花的  $R^2$  为 0.510,拟合优度较理想;其  $F$  统计量的相伴概率值为 0.002,表明得出的回归方程显著有效;土壤全盐量的回归系数假设检验概率值小于 0.05,表明土壤全盐量显著影响棉花的 NDVI;地下水埋深的回归系数假设检验概率值>0.05,表明地下水埋深对棉花 NDVI 的影响不显著。棉花的生长与土壤有机质有关,灌溉、施肥对棉花的影响很大。

芦苇的  $R^2$  为 0.417,拟合优度较理想;其  $F$  统计量的相伴概率值为 0.003,表明得出的回归方程显著有效;全盐量的回归系数假设检验概率值为 0.001,表明土壤全盐量对芦苇 NDVI 有显著影响,地下水埋深的回归系数假设检验概率值为 0.068,表明地下水埋深对芦苇 NDVI 影响不显著。原因是芦苇既可以成群大面积地生长在浅水沼泽中,又可以在季节性积水的各种环境下繁茂生长<sup>[28]</sup>,在地下水埋深较深的地区还可以生长旱芦苇。

### 3 讨论与结论

黄河三角洲地下水埋深对土壤盐分的平均影响系数为 0.327。地下水埋深在 0.5~1.5 m 时,30~40 cm 土层发生中度以上盐渍化的可能性最大,属于强盐化深度。地下水埋深<0.5 m 时,地下水不但参与土壤积盐而且对积盐程度影响较大;地下水埋深在 0.5~2.5 m 时,地下水参与土壤积盐,但对积盐程度影响较小;地下水埋深>2.5 m 时,地下水基本不参与土壤积盐,表层土壤盐渍化较轻。地下水是研究区生态环境敏感因子。由于研究区土壤质地以砂壤、轻壤为主,地下水矿化度普遍较高,土壤易盐渍化,所以地下水埋深在研究区是相当重要的环境因子。很多学者都从研究地下水埋深出发,来治理土壤盐渍化问题<sup>[29]</sup>、恢复研究区生态系统<sup>[10,30]</sup>。本文仅运用信息量统计分析法粗略探讨了地下水埋深对土壤盐分的影响。而精确、定量地研究黄河三角洲地下水(埋深、矿化度)与土壤盐渍化的关系,为研究区的水盐调控方案提供科学依据,仍需要新方法、新手段进一步探索。

地下水埋深、土壤盐分对物种分布具有显著影响。翅碱蓬、柽柳、芦苇分布在地下水埋深较浅和中土壤含盐量的地方,刺槐林分布在地下水埋深较深、土壤盐分较低的地方,棉花主要分布在地下水埋深

较浅、土壤盐分较低的地方,这与前人的许多研究相吻合<sup>[31~32]</sup>。而且地下水是研究区植被的重要影响因素,是区域生态环境的敏感因素,安乐生等<sup>[33]</sup>利用同位素法也证明了这一结果。

研究区内植被发育较差,不同植被类型的 NDVI 受地下水埋深和土壤盐分的影响程度不同。土壤盐分对本研究所涉及植被类型 NDVI 的影响很显著,翅碱蓬、柽柳、芦苇虽然是耐盐植物且在研究区分布较广,但其长势受土壤盐分的影响显著;地下水埋深对翅碱蓬、柽柳 NDVI 的影响显著,对芦苇、棉花、刺槐林 NDVI 的影响不显著。很多研究都表明:翅碱蓬、柽柳群落演替、分布、生长受地下水埋深和土壤盐分两个主要环境梯度的影响<sup>[34~35]</sup>;芦苇的生态位较广<sup>[36~37]</sup>,地下水埋深较深时可生长旱芦苇,芦苇又可以大面积生长在浅水沼泽中,因此人工种植芦苇有利于保护环境。

土壤盐分和地下水埋深是限制黄河三角洲地区植被分布、生长发育的两个关键因子,但也受到其他生态因素的影响,如植物竞争、土壤养分等。本文所得结论仅针对地下水埋深和土壤盐分两个主要环境梯度,其准确性受到其他生态因素的影响,而且植被、土壤盐分与地下水埋深之间的关系也很复杂。由于合理的地下水埋深可以防止土壤盐渍化,合理的地下水埋深以及合理的土壤含盐量使植被生长发育良好,因此在地下水埋深普遍较浅、矿化度较高,再加上海水入侵的情况下,研究地下水埋深、土壤盐分以及植被间的关系就显得尤为重要。本文所采用的衡量地下水埋深和土壤盐分对植被分布、发育影响解释程度的计算方法比较粗略。精确、定量地确定地下水埋深和土壤盐分对植被分布、发育的关系,仍需新手段、新方法的进一步探索。

### 参考文献

- [1] Jin CH. Biodiversity dynamics of freshwater wetland ecosystems affected by secondary salinisation and seasonal hydrology variation: A model-based study. *Hydrobiologia*, 2008, **598**: 257~270
- [2] Hucklebridgea KH, Staceyb MT, Glennb EP, et al. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland. *Ecological Engineering*, 2010, **36**: 850~861
- [3] Zhang X-L (张绪良), Xiao Z-M (肖滋民), Xu Z-J (徐宗军), et al. Biodiversity characteristics and protection countermeasures of the coastal wetlands in Yellow River Delta. *Journal of Wetland Science* (湿地科学),

- 2011, **9**(2): 125–131 (in Chinese)
- [4] Antonellini M, Mollema PN. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering*, 2010, **36**: 1201–1211
- [5] Yao R-J (姚荣江), Yang J-S (杨劲松), Liu G-M (刘广明), et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(6): 61–66 (in Chinese)
- [6] Fan X-M (范晓梅), Liu G-H (刘高焕), Tang Z-P (唐志鹏), et al. Analysis on main contributors soil salinization of Yellow River Delta. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(1): 139–140 (in Chinese)
- [7] Liu Q-S (刘庆生), Liu G-H (刘高焕), Fan X-M (范晓梅). Temporal-spatial distribution of soil salinity profile types in the Yellow River Delta. *Shandong Agricultural Sciences* (山东农业科学), 2010(1): 57–62 (in Chinese)
- [8] Wang N-N (王娜娜), Qi W (齐伟), Wang D (王丹), et al. Spatial variability of soil nutrients and salinity in coastal saline-alkali land based on belt transect method. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(6): 1527–1532 (in Chinese)
- [9] Cui B-S (崔保山), Zhao X-S (赵欣胜), Yang Z-F (杨志峰), et al. The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(5): 1533–1541 (in Chinese)
- [10] Rong L-S (荣丽杉), Liu G-H (刘高焕), Shu L-C (束龙仓), et al. Study on ecologic water level cover depth in Yellow River Delta. *Water Resources and Power* (水电能源科学), 2010, **28**(6): 92–96 (in Chinese)
- [11] Cui B-S (崔保山), Li Y-H (李英华), Yang Z-F (杨志峰). Management-oriented ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(3): 606–614 (in Chinese)
- [12] Wu Z-F (吴志芬), Zhao S-L (赵善伦), Zhang X-L (张学雷). Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the Yellow River Delta. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1994, **18**(2): 184–193 (in Chinese)
- [13] Zhao X-S (赵欣胜), Cui B-S (崔保山), Sun T (孙涛), et al. The relationship between the spatial distribution of vegetation and soil environmental factors in the tidal creek areas of the Yellow River Delta. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19**(8): 1855–1861 (in Chinese)
- [14] Xu X-G (许学工). *The Huanghe River Delta; Territorial Structure, Comprehensive Exploitation and Sustainable Development*. Beijing: Ocean Press, 1998 (in Chinese)
- [15] Cui C-Q (崔承琦), Li X-L (李学伦), Yin P (印萍). The geomorphologic environmental system in the Yellow River Delta. *Journal of Ocean University of Qingdao* (青岛海洋大学学报), 1994(suppl. 3): 1–7 (in Chinese)
- [16] Li S-N (李胜男), Wang G-X (王根绪), Deng W (邓伟). Variations of groundwater depth in Yellow River Delta in recent two decades. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2008, **27**(5): 49–56 (in Chinese)
- [17] Cao J-R (曹建荣), Yu H-J (于洪军), Xu X-Y (徐兴永), et al. Change characteristics and optimal deployment of water resources in Yellow River Delta. *Yellow River* (人民黄河), 2010, **32**(6): 71–72 (in Chinese)
- [18] Zhao Y-M (赵延茂), Song C-S (宋朝枢). *Scientific Survey of the Yellow River Delta National Nature Reserve*. Beijing: China Forestry Press, 1995 (in Chinese)
- [19] Xu X-G (许学工), Guo H-H (郭洪海), Peng H-F (彭慧芳). Impacts of plain reservoir on its surrounding underground water and soil with Gengjing Reservoir in the Yellow River Delta as an example. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2004, **24**(1): 115–119 (in Chinese)
- [20] Guan Y-X (关元秀), Liu G-H (刘高焕), Wang J-F (王劲峰). Regionalization of salt-affected land for amelioration in the Yellow River Delta based on GIS. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **56**(2): 198–205 (in Chinese)
- [21] Sun Z-Y (孙稚颖), Zhou F-Q (周凤琴), Guo Q-M (郭庆梅). Investigation of medicinal plant resources of Hekou tamarisk forest farm in Dongying. *Territory & Natural Resources Study* (国土与自然资源研究), 2009(1): 93–94 (in Chinese)
- [22] Zhang M-X (张妙仙), Yang J-S (杨劲松). Information statistical analysis of effecting of groundwater depth on soil and water-salt. *Soils* (土壤), 2001, **33**(5): 239–242 (in Chinese)
- [23] Lososová Z, Chytry M, Cimalová S, et al. Weed vegetation of arable land in central Europe: Gradients of diversity and species composition. *Journal of Vegetation Science*, 2004, **15**: 415–422
- [24] Song C-C (宋长春), Deng W (邓伟). Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in western Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2000, **20**(3): 246–250 (in Chinese)

- [25] Yao R-J (姚荣江), Yang J-S (杨劲松), Jiang L (姜龙). Analysis on factors of salt accumulation and intensity in topsoil in the saline region of Lower Yellow River Delta. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(5): 1115–1119 (in Chinese)
- [26] Yang J-Z (羊锦忠), Li F-L (李凤岭), Hao X-W (郝孝文), et al. Analysis of the relationship between groundwater and salts accumulation in soil. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 1965, **6**(2): 72–78 (in Chinese)
- [27] Xi J-B (郗金标), Xing S-J (邢尚军), Song Y-M (宋玉民), et al. Characteristics of soil salt and nutrient of different afforestation systems in Yellow River Delta Area. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43** (suppl. 1): 33–38 (in Chinese)
- [28] Yao R-J (姚荣江), Yang J-S (杨劲松). Evaluation on spatial distribution of groundwater depth and soil salinity by indicator kriging in a typical area of Yellow River Delta. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(6): 2118–2124 (in Chinese)
- [29] Tan X-J (谭学界), Zhao X-S (赵欣胜). Spatial distribution and ecological adaptability of wetland vegetation in Yellow River Delta along a watertable depth gradient. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2006, **25** (12): 1460–1464 (in Chinese)
- [30] Yao L (姚玲), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), et al. Remote sensing monitoring the health of artificial *Robinia pseudoacacia* forest. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (武汉大学学报·信息科学版), 2010, **35**(7): 863–867 (in Chinese)
- [31] Fan X-M (范晓梅). Groundwater Dynamic and Its Ecological Effects in Yellow River Delta. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2007 (in Chinese)
- [32] He Q (贺强), Cui B-S (崔保山), Zhao X-S (赵欣胜), et al. Vegetation distribution patterns to the gradients of water depth and soil salinity in wetlands of Yellow River Delta, China. *Wetland Science* (湿地科学), 2007, **5**(3): 208–214 (in Chinese)
- [33] An L-S (安乐生), Zhao Q-S (赵全升), Ye S-Y (叶思源), et al. Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2011, **22**(5): 689–695 (in Chinese)
- [34] Cui B-S (崔保山), He Q (贺强), Zhao X-S (赵欣胜). Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(4): 1408–1418 (in Chinese)
- [35] Cui B-S (崔保山), He Q (贺强), Zhao X-S (赵欣胜), et al. Niches of plant species in wetlands of the Yellow River Delta under gradients of water table depth and soil salinity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(5): 969–975 (in Chinese)
- [36] Ma Z-W (马宗文), Xie Z-L (谢正磊), Duan X-F (段晓峰), et al. Plant-soil relationship and plant niche in the Yellow River Delta National Natural Reserve, China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报·自然科学版), 2012, **48**(5): 801–811 (in Chinese)
- [37] Li F (李峰), Xie Y-H (谢永宏), Chen X-S (陈心胜), et al. Composition of aquatic plants and their niche characteristics in wetlands of Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(11): 6257–6265 (in Chinese)

**作者简介** 马玉蕾,女,1988年生,硕士。主要从事地下水数值模拟及地下水的地表生态效应。E-mail: mayulei1988@126.com

**责任编辑** 杨弘