

黄三角濒海区土壤水盐时空分异特征及耦合关系分析

张术伟, 王卓然, 常春艳, 赵庚星, 陈悦, 潘敬瑞

(山东农业大学资源与环境学院土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018)

摘要: 选择黄河三角洲代表区域垦利区和无棣县, 将野外调查与室内分析得到的土壤表层水盐数据, 按照季节、植被类型、与渤海距离进行归类, 利用经典统计分析、耦合度模型、缓冲区分析、Origin 三维关系分析等方法, 分析研究区土壤表层(0—15 cm)水盐时空分异特征及其耦合关系。结果表明: 研究区土壤水盐含量总体较高, 含盐量以中度盐渍化为主, 垦利土壤表层水盐含量整体高于无棣; 不同季节土壤含水量排序为夏季>春季>秋季>冬季, 土壤含盐量排序为春季>秋季>冬季>夏季, 耦合度关系比较为春季>秋季>冬季>夏季; 不同植被类型土壤含水量排序为荒草地>光板地>耕地>林地, 土壤含盐量排序为光板地>荒草地>耕地>林地, 耦合度关系比较为光板地>荒草地>耕地>林地; 由近海到内陆, 研究区土壤表层含水量、含盐量以及水盐耦合度呈现逐步递减的趋势, 其中无棣变化趋势较为平缓, 垦利土壤含盐量在距海 40~50 km 处上升, 土壤含水量在距海 30~40 km 处明显上升, 表层水盐耦合度也有所提高。研究结果为黄三角濒海区土壤资源的合理规划利用提供理论依据。

关键词: 土壤含水量; 土壤含盐量; 耦合关系; 垦利区; 无棣县

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0299-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.037

Spatial-temporal Characteristics of Soil Water and Salt and Its Coupling Relationship in the Coastal Area of Yellow Triangle

ZHANG Shuwei, WANG Zhuoran, CHANG Chunyan, ZHAO Gengxing, CHEN Yue, PAN Jingrui

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National

Engineering Laboratory for Efficient of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In this study, Kenli District and Wudi County, representative regions of the Yellow River Delta, were selected to classify the soil surface water and salt data obtained from field survey and indoor analysis according to seasons, vegetation types and the distance from Bohai Sea. Classical statistical analysis, coupling degree model, buffer zone analysis, origin three-dimensional relationship analysis and other methods were used. The spatial-temporal characteristics of water and salt in soil surface (0—15 cm) and its coupling relationship were analyzed. The results showed that the soil water and salt content was higher in the study area, and the salt content was mainly moderate salinization. The water and salt contents of soil surface in Kenli District was higher than those of Wudi. The order of soil water contents in different seasons was summer>spring>autumn>winter, and the order of soil salt contents was spring>autumn>winter>summer. The relationship of coupling degree was spring>autumn>winter>summer. The order of soil water contents of different vegetation types was waste grassland>bare land>cultivated land>forest land, the order of soil salt contents was bare land>waste grassland>cultivated land>forest land, and the order of coupling degree was bare land>waste grassland>cultivated land>forest land. From offshore to inland, soil surface water content, salt content and coupling degree of water and salt in the study area gradually decreased. The changing trend in Wudi County was gentle, while the salt content in Kenli District increased from 40 to 50 km to the sea, and the water content increased significantly from 30 to 40 km to the sea, and

收稿日期: 2021-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877003); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010724); 山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD02)

第一作者: 张术伟(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地资源与信息研究。E-mail: zsw00019@163.com

通信作者: 王卓然(1989—), 男, 讲师, 主要从事土地资源与遥感、土壤资源信息技术研究。E-mail: wzr543@s126.com

赵庚星(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事资源遥感研究。E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

the coupling degree of surface water and salt also increased. These results provide a theoretical basis for the rational planning and utilization of soil resources in the coastal area of the Yellow River Delta.

Keywords: soil water content; soil salt content; coupling relationship; Kenli District; Wudi County

土壤盐渍化作为最具破坏性的环境胁迫之一^[1],对生态系统的稳定构成主要威胁^[2],我国滨海盐碱地约占全国盐碱地面积的 40%^[3],严重制约了区域农业生产和经济的可持续发展^[4]。在地势低平的黄三角洲地区,土壤盐渍化面积约为 44.29 万 hm²,占总面积的 50%以上,其中重度盐渍化土壤和盐碱光板地 23.63 万 hm²,约占总面积的 28.3%^[5],因此,及时掌握该区土壤水盐的时空特征及耦合关系,对于抑制土壤盐渍化的发展、挖掘盐渍化土地的利用潜力具有重要意义。

土壤水盐动态在一定程度上反映了土壤盐渍化的程度和状态,是气候、地形、土壤、植被和水文等多种因素影响的结果^[6],是深入研究盐碱地迁移变化的核心和有效改造盐碱地的基础。国外学者 Jacopo 等^[7]实地测量并分析了 Chiascio 河上游流域 Umbria 地区(意大利中部)土壤水分时空变异特征;Naoki 等^[8]建立土壤盐分预测模型研究了海水影响下荒川河口人工盐沼土壤和水体盐分的时空变化规律;Kaman 等^[9]利用地理信息系统技术监测土耳其南部 Seyhan 平原的 Akarsu 灌区农田地下水水位和盐度的时空变化。我国学者郭勇等^[10]研究新疆农田—防护林—荒漠复合生态系统水盐运移规律并构建 BP 神经网络土壤水盐耦合模型;魏建涛等^[11]探寻膜下滴灌条件下犁底层深度对土壤水盐运移的影响规律。在盐碱地区水盐相关性及耦合关系的研究中,吕真真等^[12]定量分析了黄河三角洲不同时期土

壤表层盐分含量与各地下水特征的关联情况;马贵仁等^[13]探明了河套灌区不同深度土壤盐分的空间变化及其与地下水埋深相关性;由国栋等^[14]探讨了北疆地区膜下滴灌棉田冻融期间不同土层水热盐的变化和耦合关系。总体看,目前研究较多集中在干旱半干旱地区地下水迁移下的水盐相关性、冰川地区土壤冻融下的水盐耦合及分布特征,而东部滨海地区表层土壤水盐耦合关系的研究相对缺乏。

为此,本文选择黄河三角洲濒海区域,从不同季节、不同植被类型、距渤海远近等方面研究土壤水盐时空变异特征,探求土壤表层水盐耦合关系,为黄三角濒海区因地制宜采取针对性措施,合理规划并有效改造盐渍土壤资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于山东省北部即渤海湾南岸和莱州湾西岸,是黄河携带中游泥沙在渤海凹陷处日益沉积形成的冲积平原,主要分布于山东省东营市和滨州市境内,沿黄河走向,地势由西南向东北倾斜。地处暖温带大陆性季风气候区,由于地势低平,地下径流缓慢,排水不畅,土壤含盐量高。本文选取黄河三角洲东部核心区域垦利区和西部核心区域无棣县为研究区,具体地理位置见图 1。

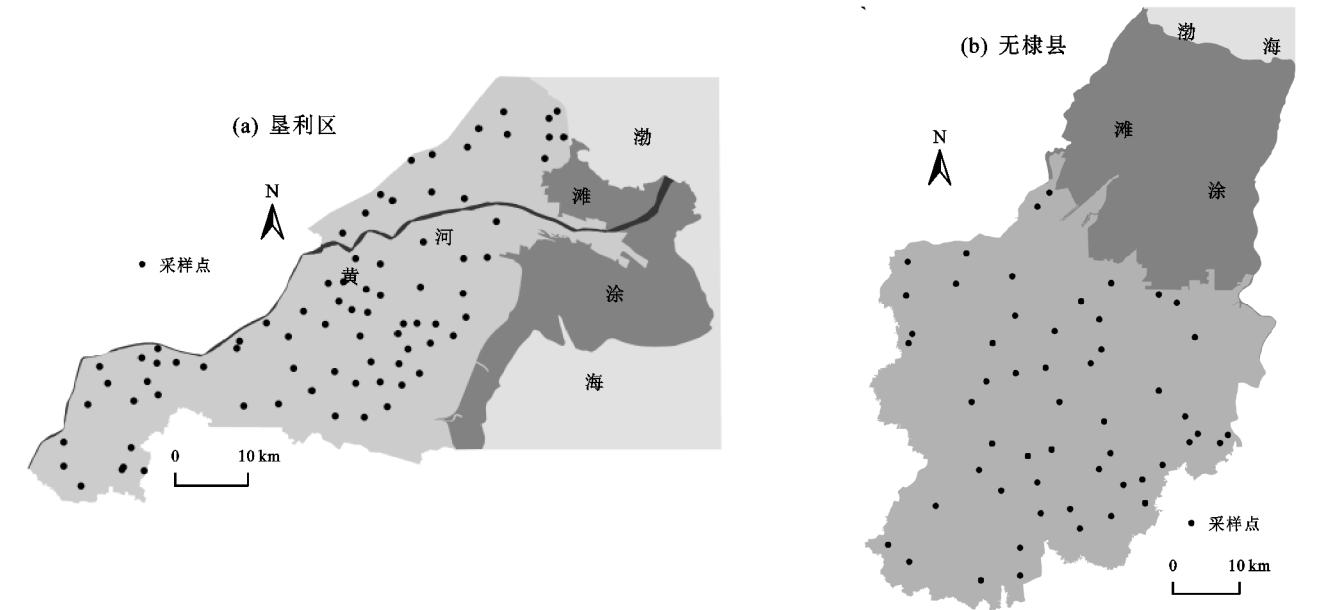


图 1 研究区地理位置及样点分布

垦利区(37°24′—37°57′N, 118°15′—119°19′E)隶属于山东省东营市,地处黄河入海口处,东部受渤

海的侵蚀,土壤发育差,土壤盐碱化严重;西部是重要的农耕区,人类活动密集,土壤条件较好,土壤盐碱化

程度相对较低。垦利区地处暖温带季风大陆性气候区,春季干旱多风,夏季潮湿酷热,秋季凉爽温和,冬季干燥寒冷,春旱及夏涝灾害频繁。该区地形较为平缓,具有典型的三角洲地貌特征,地貌类型有海滩地、倾斜平地 and 河滩高地,坡降比仅 1/8 000~1/12 000,黄河流经贯穿于海。主要土壤类型为盐化潮土和滨海盐土,耕层质地以砂壤和轻壤为主,毛细管作用强烈,加上地下水埋深浅且矿化度高,受黄河水侧漏和海水浸渍的影响,土壤盐渍化现象较为普遍,给农业生产带来严重影响。

无棣县(37°41′—38°16′N, 117°31′—118°04′E)隶属山东省滨州市,位于山东省最北部。该县地处大陆性半干旱半湿润季风气候区,春季多风干燥,夏热多雨,秋季温和凉爽,冬冷寒长。地处华北平原鲁西北黄河冲积平原,自西南向东北依次为黄泛平原、滨海平原和渤海湾平原,以 1/1 000 的坡降自西南向东北倾斜到渤海湾。该县共有潮土、盐土和褐土三大土类,滨海潮土主要分布在县域西部,土层深厚,土体构型以通体黏和黏体型为主,保水肥性较好,养分含量丰富,多为高产田。境内的农田灌溉主要是引黄灌溉,生态条件脆弱,有不少盐斑分布,影响农业生产。

1.2 野外调查与采样

综合考虑地理位置、土地利用方式、植被类型、土壤地形等因素布设采样点,分别在垦利区、无棣县布设土壤调查点位 81,54 个,野外调查采用 EC110 便携式盐分计测定土壤表层(0—15 cm)电导率,采用 T 系列土壤水分温度速测仪测定 0—15 cm 土壤表层水分含量。采用单点取样法采集 0—15 cm 的土壤表层样品,以手持 GPS 定位仪测定实地坐标。

1.3 试验分析与数据处理

1.3.1 土壤表层含水量 采用烘干法测定土壤表层含水量:将带有土壤样品的铝盒置于(105±2)℃的恒温箱内烘至恒重,称重并计算出各土样的质量含水量;采用环刀法测定土样的容重,进而计算其容积含水量。将室内化验与野外实测得到的 2 组土壤表层含水量数据进行相关分析,模型为 $W_o = 0.911W_i + 0.242, n = 81, R^2 = 0.989$ 。式中: W_o 为室内试验土壤表层含水量(%); W_i 为野外实测土壤表层含水量(%),并以此对野外含水量数据进行校正。

1.3.2 土壤表层含盐量 将采集的土壤带回实验室内自然风干,磨碎、过 2 mm 筛后用于测定含盐量。所有的土样均配制成水土比为 5 : 1 的浸提液,振荡 5 min,静置 30 min,采用烘干法测定土壤含盐量。同时,采用 EC110 便携式盐分计测定土壤浸提液的

电导率,建立土壤浸提液电导率($EC_i, \mu S/cm$)和含盐量($S_i, g/kg$)之间的关系方程 $S_i = 0.004 \times EC_i + 0.237, n = 81, R^2 = 0.974$ 。在此基础上,以土壤浸提液电导率对野外电导率数据进行校正,得到垦利区野外实测土壤电导率($EC, \mu S/cm$)与含盐量($S_i, g/kg$)之间的关系方程 $S_i = 0.00218EC + 0.727, n = 81, R^2 = 0.938$;无棣县的关系方程 $S_i = 0.00211EC + 0.875, n = 54, R^2 = 0.968$ 。将验证土样数据代入该方程,得到的拟合结果与室内化验结果的比较精度均大于 0.93,因而以此关系方程对全部野外电导率数据进行转换,得到土壤盐分含量数据。

将两区域的数据分别按不同季节、不同植被类型、距渤海远近等划分为土壤表层含水量和含盐量数据组。参照我国滨海区的土壤盐渍化分级标准,将土壤盐渍化分为 5 级:非盐渍化土(<1.0 g/kg)、轻度盐渍化土(1.0~2.0 g/kg)、中度盐渍化土(2.0~4.0 g/kg)、重度盐渍化土(4.0~6.0 g/kg)、盐土(>6.0 g/kg)。

1.4 研究方法

1.4.1 土壤水盐时空分异特征分析 采用 SPSS 和 Excel 软件进行数据的统计分析,采用统计学方法分析不同季节、不同植被类型、距渤海远近不同情况下土壤表层(0—15 cm)水盐的描述性统计特征,根据变异系数 $CV < 0.1$ 为弱变异, $0.1 < CV < 1$ 为中等变异, $CV > 1$ 为强变异对土壤表层含水量和含盐量变异程度进行分级^[15]。以实际距离 10 km 构建垦利区、无棣县的渤海缓冲区,并分析离渤海远近的土壤水盐空间变异。

1.4.2 土壤水盐耦合关系分析

(1)耦合度分析。耦合原本作为物理学概念,是指 2 个(或 2 个以上)系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象^[16]。耦合度是描述系统或要素相互影响的程度,可以更好地展示“盐随水来、水散盐留”的水盐运动规律。

借鉴物理学中的容量耦合(capacitive coupling)概念及容量耦合系数模型,推广得到多个系统(或要素)相互作用耦合度模型^[17]。即:

$$Cn = \{(u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_m) / [\prod (u_i + u_j)]\}^{1/n} \quad (1)$$

为便于分析,可直接得到土壤表层含水量 u_1 与含盐量 u_2 的耦合度函数:

$$C = 2\{(u_1 \cdot u_2) / [(u_1 + u_2)(u_1 + u_2)]\}^{1/2} \quad (2)$$

显然,耦合度值 $C \in [0, 1]$ 。当 $C = 0$,耦合度极小,表示水盐处于无关状态,水盐将向无序发展。当 $C = 1$,耦合度最大,表示水盐之间达到共振耦合。耦合度越大则水盐的有序状态越高,水盐相互影响的程度越大。

本文运用耦合度函数(2)对黄河三角洲地区表层

含水量和含盐量进行时空耦合,对野外采集数据进行分析,并用 Origin 立体三维俯视图进行水分、盐分以及耦合度之间关系的直观展示。

(2)回归分析。分析不同季节、植被类型、距海远近下土壤表层含水量和含盐量之间的回归关系,以样点土壤表层含盐量数据为 y 轴,样点土壤表层含水量数据为 x 轴做回归曲线。若呈正相关关系,即盐分随着土壤水分含量的增加而增加;若呈负相关关系,则随着土壤水分含量的增加而减少。回归方程斜率绝对值(K)的大小可用以比较随着土壤水分的增加盐分上升或下降的幅度大小。决定系数(R^2)是方程拟合优度的度量,数值范围从 0~1, R^2 数值越大,说明回归方程拟合效果越好, x 与 y 线性关系越强; R^2 数值越小,说明 x 与 y 的线性关系越弱,两者之间的独立性越强。可通过比较 R^2 大小以比较土壤水盐的相关程度。

2 结果与分析

2.1 土壤水盐状况的时空特征分析

2.1.1 土壤水盐的季节性特征

(1)土壤盐分的季节性特征。从表 1 可以看出,

表 1 研究区土壤含盐量季节特征统计

研究区	季节	样本数	平均值±标准差/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中位数/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最小值/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	峰度	偏度	变异 系数
垦利区	春季	185	7.40±7.17a	3.99	1.12	41.62	5.73	2.25	0.97
	夏季	138	4.22±4.98b	2.09	0.62	22.80	4.10	2.19	1.18
	秋季	160	7.22±6.01a	3.79	1.09	44.35	7.18	1.86	0.83
	冬季	173	5.61±5.32c	2.86	1.14	36.06	12.91	3.33	0.94
无棣县	春季	141	4.34±5.24a	2.95	1.02	35.80	22.56	4.48	1.21
	夏季	110	3.43±3.72b	2.39	1.23	30.20	28.02	4.80	1.08
	秋季	134	4.27±4.26a	2.78	1.10	35.50	20.34	4.15	0.99
	冬季	140	3.61±4.48c	2.46	1.08	32.68	20.59	4.34	1.24

注:平均值后的字母为多重比较结果,两两之间若有一个字母相同,表示差异不显著($p>0.05$)。下同。

(2)土壤水分的季节性特征。从表 2 可以看出,黄三角濒海地区土壤含水量总体较高,不同季节有较大差异,近似呈正态分布。按含水量大小的季节顺序为夏季>春季>秋季>冬季,随季节变化含水量呈现先升高后降低的趋势。水分变异系数为 0.13~0.35,为中等变异。根据多重比较结果,春秋季节的土壤含水量差异不明显,而夏冬季的土壤含水量均与其他时期存在显著差异。分地区来看,垦利区含水量最高值为 43.65%,最低值为 28.20%;无棣县含水量最高值为 36.92%,最低值为 19.80%,垦利区含水量整体高于无棣县。从变异程度看,垦利区夏季含水量均值(43.65%)为冬季(28.20%)的 1.46 倍,无棣县夏季含水量均值(36.92%)近乎冬季(19.80%)的 1.92 倍,说明无棣县土壤含水量的季节性变化较为明显。一年四季垦利区变异系数分别为 0.23,0.18,0.23,0.31,无棣县变异系数分别为 0.35,0.13,

不同季节土壤表层盐分有较大差异,其含盐量平均值与中位数相比,前者明显大于后者,说明含盐量呈左偏态分布,因此,采用中位数较为适宜。整体来看,研究区土壤盐渍化属于中度盐渍化水平,按含盐量大小的季节顺序为春季>秋季>冬季>夏季,含盐量呈现年内积盐—降盐—积盐—降盐的季节趋势。盐分变异系数为 0.83~1.24,接近或为强变异,说明研究区域内盐分数值变化较大。根据多重比较结果,春秋季节的土壤含盐量差异不明显,而夏冬季的土壤含盐量均与其他时期存在显著差异。

分地区看,垦利区含盐量中位数最高值为 3.99 g/kg,最低值为 2.09 g/kg,四季均值为 3.04 g/kg;无棣县含盐量最高值为 2.95 g/kg,最低值为 2.39 g/kg,四季均值为 2.67 g/kg,说明垦利区含盐量整体高于无棣县。从变异程度来看,两地含盐量最大值与最小值之比分别为 1.91,1.23,说明垦利区含盐量季节性差异较为明显。一年四季垦利区土壤含盐量变异系数分别为 0.97,1.18,0.83,0.94,无棣县为 1.21,1.08,0.99,1.24,说明无棣县各季节土壤含盐量空间变异程度较强。

0.43,0.31,相较于垦利区,无棣县春秋季节土壤含水量的空间变异较强。

2.1.2 土壤水盐的植被类型分异特征

(1)土壤盐分的植被类型分异。从表 3 可以看出,土壤表层含盐量平均值明显大于中位数,说明含盐量呈左偏态分布,因此,采用中位数较为适宜。整体看,春季各植被类型的土壤含盐量高于秋季,两季土壤含盐量从大到小的植被类型为光板地>荒草地>耕地>林地。前二者土壤含盐量均属于盐土水平,后二者为中度盐渍化水平。同时光板地、荒草地盐分变异系数较大,说明其土壤含盐量高且分布不均,有较大的空间差异性。根据多重比较结果,耕地、林地的土壤含盐量差异不明显,荒草地和光板地土壤含盐量均与其他植被类型存在显著差异。相较于垦利区,无棣县各植被类型的土壤含盐量较低,春秋季节各植被类型之间土壤含盐量差异较为明显。

表 2 研究区土壤含水量季节特征统计

研究区	季节	样本数	平均值±标准差/%	中位数/%	最小值/%	最大值/%	峰度	偏度	变异系数
垦利区	春季	185	38.28±8.63a	38.97	10.25	54.21	−0.31	−0.52	0.23
	夏季	138	42.72±7.84b	43.65	30.13	55.80	−0.96	−0.38	0.18
	秋季	160	37.75±8.75a	38.00	15.56	51.91	−0.75	−0.41	0.23
	冬季	173	29.28±9.12c	28.20	7.00	50.00	−0.21	0.01	0.31
无棣县	春季	141	24.66±8.63a	22.66	9.16	57.75	0.56	1.13	0.35
	夏季	110	38.28±5.02b	36.92	25.27	52.64	−0.33	0.34	0.13
	秋季	134	23.17±10.05a	20.06	9.81	52.18	0.41	1.06	0.43
	冬季	140	19.92±6.32c	19.80	7.10	37.80	−0.24	0.29	0.31

表 3 研究区春、秋季各植被类型土壤含盐量特征统计

季节	研究区	植被类型	样本数	平均值±标准差/ (g·kg ^{−1})	中位数/ (g·kg ^{−1})	最小值/ (g·kg ^{−1})	最大值/ (g·kg ^{−1})	峰度	偏度	变异系数
春季	垦利区	耕地	108	3.20±0.90a	3.29	1.54	5.50	−0.30	0.33	0.28
		林地	90	2.85±0.88a	3.02	1.22	4.25	−1.35	−0.18	0.31
		荒草地	141	16.21±9.25b	13.91	2.77	46.93	2.11	1.55	0.57
		光板地	110	29.30±21.08c	28.78	1.65	68.31	−1.16	0.34	0.72
	无棣县	耕地	108	3.15±0.81a	3.05	1.80	5.35	−0.23	0.57	0.26
		林地	96	2.70±0.84a	2.55	1.26	4.67	−0.17	0.60	0.31
		荒草地	87	13.01±11.09b	9.68	1.50	43.75	0.85	1.23	0.85
		光板地	82	24.66±18.61c	23.90	1.65	56.17	−1.63	0.15	0.75
秋季	垦利区	耕地	89	3.11±0.68a	3.09	1.42	4.76	−0.14	−0.27	0.22
		林地	111	2.70±0.80a	2.97	1.56	5.44	0.08	0.38	0.30
		荒草地	90	11.23±7.30b	11.00	1.52	35.73	1.05	0.91	0.65
		光板地	67	26.01±18.29c	20.67	1.45	69.15	0.47	0.62	0.70
	无棣县	耕地	123	2.85±0.89a	2.78	1.15	4.98	0.66	0.32	0.18
		林地	85	2.65±0.79a	2.36	1.06	4.39	−0.16	0.44	0.30
		荒草地	105	11.14±10.76b	7.33	1.26	40.23	0.58	1.25	0.97
		光板地	92	22.05±18.26c	15.49	1.45	56.17	−1.44	0.41	0.83

(2)土壤水分的植被类型分异。从表 4 可以看出,研究区不同植被的土壤表层水分含量有较大差异,春季各植被类型的土壤含水量高于秋季,两季土壤含水量从大到小的植被类型为荒草地>光板地>耕地>林地,相较于无棣县,垦利区春秋季各植被类型之间土壤含水量差异较为显著。根据多重比较结果,耕地、林地的土壤含水量差异不明显,荒草地和光板地土壤含水量均与其他植被类型存在显著差异。

表 4 研究区春、秋季各植被类型土壤含水量特征统计

季节	研究区	植被类型	样本数	平均值±标准差/%	中位数/%	最小值/%	最大值/%	峰度	偏度	变异系数
春季	垦利区	耕地	108	33.68±7.65a	34.70	20.00	50.00	−0.77	0.06	0.23
		林地	90	31.70±7.56a	31.15	20.60	51.70	−0.14	0.58	0.24
		荒草地	141	41.15±7.00b	42.06	23.70	55.50	−0.28	−0.25	0.17
		光板地	110	38.84±10.06c	37.25	16.48	58.65	−0.56	−0.08	0.26
	无棣县	耕地	108	31.93±7.42a	33.67	20.00	49.08	−0.84	0.09	0.23
		林地	96	29.87±8.11a	28.20	16.01	48.00	−1.02	0.34	0.27
		荒草地	87	38.11±8.33b	37.80	22.57	54.00	−0.45	−0.10	0.21
		光板地	82	37.55±9.35c	36.10	18.01	56.00	−0.62	−0.14	0.25
秋季	垦利区	耕地	89	32.73±6.16a	33.40	20.39	47.74	−0.31	−0.09	0.19
		林地	111	30.78±8.70a	31.00	15.00	52.91	−0.67	0.32	0.28
		荒草地	90	40.64±9.64b	39.10	20.50	57.10	−1.09	−0.10	0.24
		光板地	67	36.96±10.26c	36.70	20.01	51.30	−1.23	−0.08	0.28
	无棣县	耕地	123	30.13±5.80a	30.51	20.30	39.42	−1.28	−0.15	0.19
		林地	85	27.47±7.56a	27.35	13.00	39.70	−1.03	−0.12	0.28
		荒草地	105	36.33±10.28b	35.73	20.08	65.57	0.38	0.48	0.28
		光板地	92	35.93±8.91c	34.44	18.01	56.00	−0.46	0.21	0.25

2.1.3 土壤水盐距海远近分异特征

(1)土壤盐分距海远近分异特征。从图 2 和表 5 可以看出,由近海到内陆,研究区土壤含盐量呈现逐步下降的趋势,盐渍化程度由盐土转为重度盐渍化再转为中度盐渍化。变异系数范围为 0.17~0.78,均属于中等变异强度,且近海整体变异强度稍高于内陆地区,说明土壤含盐量处于较高水平,且分布不均。根据多重比较结果,内陆土壤含盐量差异不明显,近海处土壤含盐量存在显著差异。随距离渤海渐远,垦利区土壤含盐量均值由 23.51 g/kg 减少至 3.60 g/kg,

在距海 40~50 km 处有所上升(5.88 g/kg);无棣县土壤含盐量由 22.92 g/kg 减少至 2.70 g/kg,垦利区土壤表层含盐量整体稍高于无棣县。变异程度由近海到内陆,无棣县呈较为平缓的下降趋势,垦利区在距海40~50 km 处变异系数则有所提升。垦利区和无棣县在距海 0~10 km 处的土壤含盐量(23.51, 22.92 g/kg)分别是距海 50~60 km 处含盐量(3.60, 2.70 g/kg)的 6.53,8.48 倍,无棣县土壤含盐量的距海差异特征更为明显,表明渤海对垦利区土壤的影响距离更远。

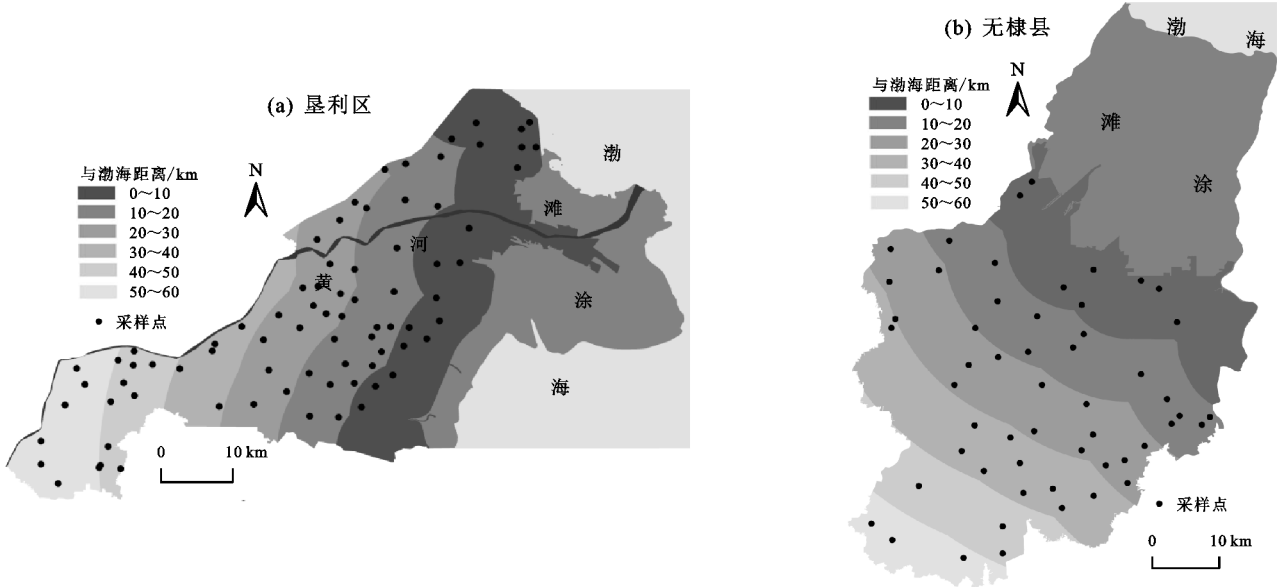


图 2 距海远近缓冲区及土壤样点

表 5 研究区距海不同缓冲区土壤表层含盐量分异特征

研究区	组号	距海 距离/km	样本数	平均值±标准差/ (g·kg ⁻¹)	中位数/ (g·kg ⁻¹)	最小值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	峰度	偏度	变异 系数
垦利区	1	0~10	46	23.51±10.50a	23.73	15.60	41.22	-0.92	0.16	0.45
	2	10~20	53	16.86±5.29b	15.10	12.41	26.57	0.69	0.88	0.53
	3	20~30	68	7.27±2.71c	6.95	1.30	15.80	2.09	1.07	0.37
	4	30~40	63	5.04±2.53c	5.48	1.58	16.58	0.75	1.03	0.50
	5	40~50	57	5.88±4.56d	5.63	1.13	26.57	0.71	1.01	0.78
	6	50~60	53	3.60±1.57c	3.10	1.55	8.10	0.75	1.18	0.44
无棣县	1	0~10	59	22.92±6.08a	21.87	12.24	36.74	-0.73	0.41	0.27
	2	10~20	52	14.78±3.08b	14.41	10.00	26.53	3.68	1.55	0.21
	3	20~30	72	5.05±2.96c	5.10	2.38	15.69	0.45	0.82	0.41
	4	30~40	70	4.17±1.68d	3.82	1.18	9.04	5.70	1.23	0.40
	5	40~50	57	3.12±0.54e	2.95	2.16	4.69	1.37	1.01	0.17
	6	50~60	55	2.70±0.64e	2.66	1.90	4.06	-0.08	0.69	0.24

(2)土壤水分距海远近分异特征。从表 6 可以看出,近海区土壤含水量明显高于内陆地区,变异系数变化范围为 0.08~0.34,均属于中等变异强度。距离渤海由近到远,垦利区土壤含水量变化范围为32.75%~43.53%,无棣县为 23.25%~40.51%,垦利区土壤表层含水量整体高于无棣县。在距海 20~30 km 处,垦利区土壤含水量由 43.53%下降至 32.75%,后增至 38.24%,呈

现先下降后上升的趋势。在距海 10~20 km 处,无棣县土壤含水量由 37.07%增至 40.51%,随着深入内陆降至 38.24%,含水量呈现先上升后下降的趋势。

2.2 土壤水盐状况的耦合关系分析

2.2.1 不同季节土壤水盐耦合关系分析 图 3、图 4 分别为垦利区和无棣县不同季节的土壤含水量与土壤含盐量之间的耦合关系。研究区水盐耦合度季节排序

为春季>秋季>冬季>夏季。从回归分析结果(表 7)可以看出,一年四季水盐关系均呈正相关关系,斜率 K 排序为秋季>春季>冬季>夏季,说明春秋季节随着表层土壤含水量的增加盐分上升的幅度较大,夏冬季盐随水增加而上升的幅度较小。决定系数 R^2 的季节排序为春季>秋季>冬季>夏季,春秋季土壤表层水盐具有较好的相关性,夏冬季土壤表层水盐之间的相关程度较弱。

表 6 研究区距海不同缓冲区土壤表层含水量分异特征

研究区	组号	距海 距离/km	样本数	平均值± 标准差/%	中位数/%	最小值/%	最大值/%	峰度	偏度	变异 系数
垦利区	1	0~10	46	43.53±3.48a	42.81	35.34	55.88	0.46	0.66	0.08
	2	10~20	53	40.83±5.62b	40.30	30.20	51.50	-0.65	0.31	0.14
	3	20~30	68	32.75±3.29c	33.10	24.30	39.10	-0.36	-0.32	0.10
	4	30~40	63	38.03±6.49d	37.82	27.20	56.80	-0.21	0.30	0.17
	5	40~50	57	38.19±6.77d	37.99	23.20	51.50	0.54	0.01	0.18
	6	50~60	53	38.24±6.91d	38.10	23.70	50.30	-0.81	-0.26	0.18
无棣县	1	0~10	59	37.07±9.03a	40.08	20.01	56.09	-0.74	0.29	0.24
	2	10~20	52	40.51±5.46b	39.00	30.20	51.50	-0.56	0.42	0.13
	3	20~30	72	26.75±9.03c	28.01	8.81	55.18	1.73	0.68	0.34
	4	30~40	70	26.51±8.91c	26.11	10.80	54.00	0.71	0.66	0.33
	5	40~50	57	23.40±3.22c	24.00	15.55	30.03	1.30	-0.71	0.14
	6	50~60	55	23.25±4.96c	22.02	16.83	31.04	-1.36	0.35	0.21

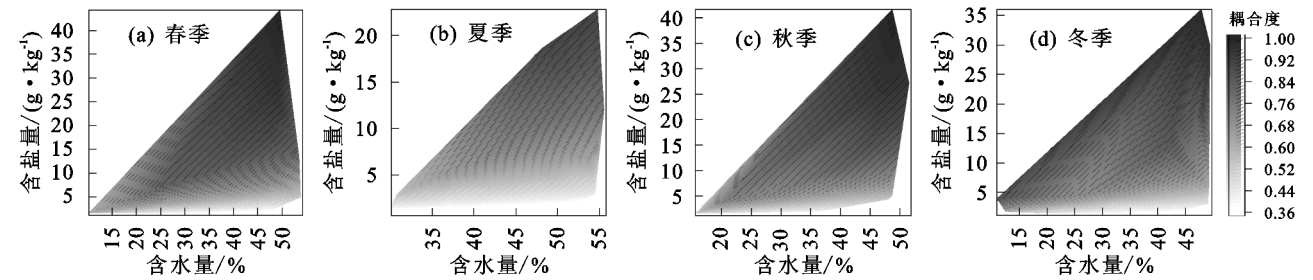


图 3 垦利区不同季节水盐耦合关系分析

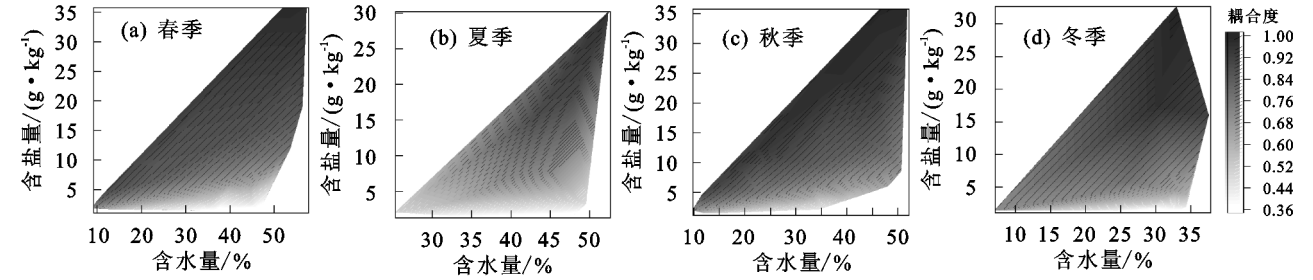


图 4 无棣县不同季节水盐耦合关系分析

表 7 研究区不同季节水盐关系回归分析

研究区	季节	回归方程	决定系数(R^2)
垦利区	春季	$y=0.46x-10.60$	0.45
	夏季	$y=0.31x-9.94$	0.24
	秋季	$y=0.54x-12.98$	0.43
	冬季	$y=0.33x-2.82$	0.27
无棣县	春季	$y=0.34x-3.26$	0.44
	夏季	$y=0.28x-10.86$	0.23
	秋季	$y=0.34x-3.54$	0.42
	冬季	$y=0.31x-3.12$	0.25

垦利区春夏秋冬季的耦合度均值分别为 0.69, 0.49, 0.66, 0.60, 无棣县的耦合度均值分别为 0.66, 0.49, 0.63, 0.57, 垦利区水盐耦合度整体高于无棣县。不同季节, 垦利区、无棣县水盐回归方程斜率变化范围分别为 0.31~0.54, 0.28~0.34, 垦利区亦高于无棣县, 说明在不同季节垦利区土壤盐分随水分增加而上升的幅度更为显著。

2.2.2 不同植被类型土壤水盐耦合关系分析 图 5、图 6 分别为垦利区和无棣县春季不同植被类型的土壤含水量与含盐量之间的耦合关系, 表 8 为春、秋季不同植被类型的水盐回归与相关分析。可以看出, 研究区水盐耦合度植被类型排序为光板地>荒草地>耕地>林地, 春季不同植被水盐耦合度稍高于秋季。回归及相关分析结果显示, 各植被类型的水盐关系均呈正相关关系, 春季各植被类型土壤表层盐随水增加而上升的幅度稍高于秋季, 斜率(K)和决定系数(R^2)从大到小均为光板地>荒草地>耕地>林地,

说明光板地、荒草地土壤表层水盐含量具有较高的相关性,随着表层土壤含水量的增加盐分上升的幅度较大,耕地、林地土壤表层水盐之间的相关程度较弱,盐随水增加上升的幅度较小。

垦利区耕地、林地、荒草地、光板地的春季水盐耦合度分别为 0.57,0.56,0.86,0.89,秋季分别为 0.56,0.55,0.77,0.89,无棣县耕地、林地、荒草地、光板地的

春季水盐耦合度分别为 0.56,0.55,0.77,0.86,秋季分别为 0.55,0.54,0.72,0.84,垦利区各植被类型的水盐耦合度稍高于无棣县。垦利区、无棣县不同植被类型水盐回归方程的斜率变化范围分别为 0.05~1.51,0.04~1.39,决定系数变化范围分别为 0.24~0.49,0.22~0.46,说明垦利区各类植被土壤表层盐随水增加的幅度及水盐相关性显著于无棣县。

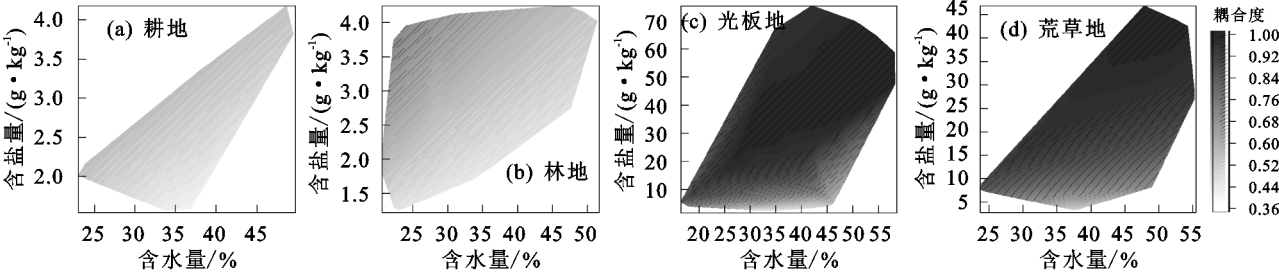


图 5 垦利区春季不同植被类型水盐耦合关系分析

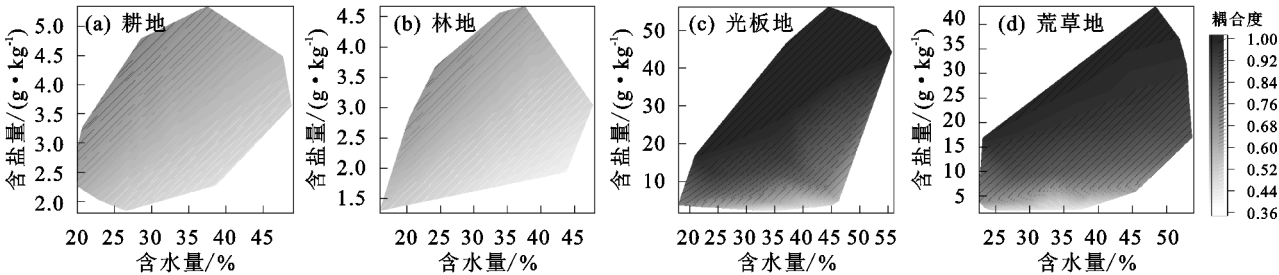


图 6 无棣县春季不同植被类型水盐耦合关系分析

表 8 研究区春、秋季不同植被类型水盐回归分析

研究区	季节	类型	回归方程	决定系数(R^2)
垦利区	春季	耕地	$y=0.07x-0.21$	0.28
		林地	$y=0.06x+1.01$	0.24
		荒草地	$y=0.83x-17.75$	0.38
		光板地	$y=1.51x-29.17$	0.49
	秋季	耕地	$y=0.06x+1.25$	0.27
		林地	$y=0.05x+1.55$	0.23
		荒草地	$y=0.46x-7.65$	0.37
		光板地	$y=1.16x-17.07$	0.42
无棣县	春季	耕地	$y=0.06x+1.34$	0.27
		林地	$y=0.05x+1.20$	0.23
		荒草地	$y=0.81x-17.80$	0.37
		光板地	$y=1.39x-27.78$	0.46
	秋季	耕地	$y=0.07x+0.61$	0.23
		林地	$y=0.04x+1.26$	0.22
		荒草地	$y=0.32x-11.30$	0.35
		光板地	$y=1.35x-26.68$	0.44

2.2.3 距海远近土壤水盐耦合关系分析 图 7、图 8 为垦利区、无棣县距海不同远近土壤含水量与土壤含盐量之间的耦合关系,表 9 为其水盐回归分析方程和决定系数。可以看出,由近海到内陆,研究区土壤水盐耦合度总体呈现逐步下降的趋势。各缓冲区土壤水盐含量呈正相关关系,盐随水增加而上升的幅度及

水盐决定系数呈下降趋势。随着离海距离的增加,无棣县水盐耦合度依次为 0.91,0.75,0.64,0.57,0.56,0.54,总体呈逐渐下降的趋势。而垦利区水盐耦合度依次为 0.96,0.88,0.71,0.81,0.64,0.61,在距海 30~40 km 处稍有提高,呈现先下降后上升再下降的趋势。垦利区、无棣县不同缓冲区水盐回归方程的斜率变化范围分别为 0.13~1.81,0.08~0.52,决定系数变化范围分别为 0.38~0.61,0.30~0.59,说明垦利区不同缓冲区土壤表层盐随水增加而上升的幅度及水盐相关性显著于无棣县。

3 讨论

研究结果显示,黄三角濒海区土壤盐化程度普遍较高,以中度盐渍化为主且盐化程度差异较大,这与相关研究^[18-19]的成果一致。相较于地处黄三角濒海区中西部的无棣县,渤海对垦利区的影响更为显著,再加上其地势低平,黄河水流贯穿至海,使垦利区土壤水分含量高于无棣县 7%~10%,盐分含量高于无棣县 0.6~2.0 g/kg,且水盐含量变异性更强,这也与相关研究^[20-21]成果一致。显示二者同为黄河三角洲代表性研究区的地理区位差异性,也说明黄三角濒海区水盐状况的高度复杂性。

(1)进一步探究黄三角濒海区水盐时空分异特征显示,水盐季节特征呈现春秋水盐较多、夏季水多盐

少、冬季水少盐较多的特征,土壤水盐分布的地域特征较为明显,远离渤海,随地势抬升和淡水补给,土壤含盐量呈现由东北部沿海逐步向中部、西南部内陆地区递减趋势,这与本地区其他相关研究^[22-23]结果一致,也同其他滨海区的研究^[24]结果类似。受黄河淡

水影响,垦利邻近河道的内陆缓冲区土壤表层盐分含量相对较低,同前人^[25]研究结果,而与我国西部内陆地区的相关研究^[26-27]结果不同,反映了滨海与内陆土壤盐渍化及其地理环境的差异,有待今后研究的细致化比较。

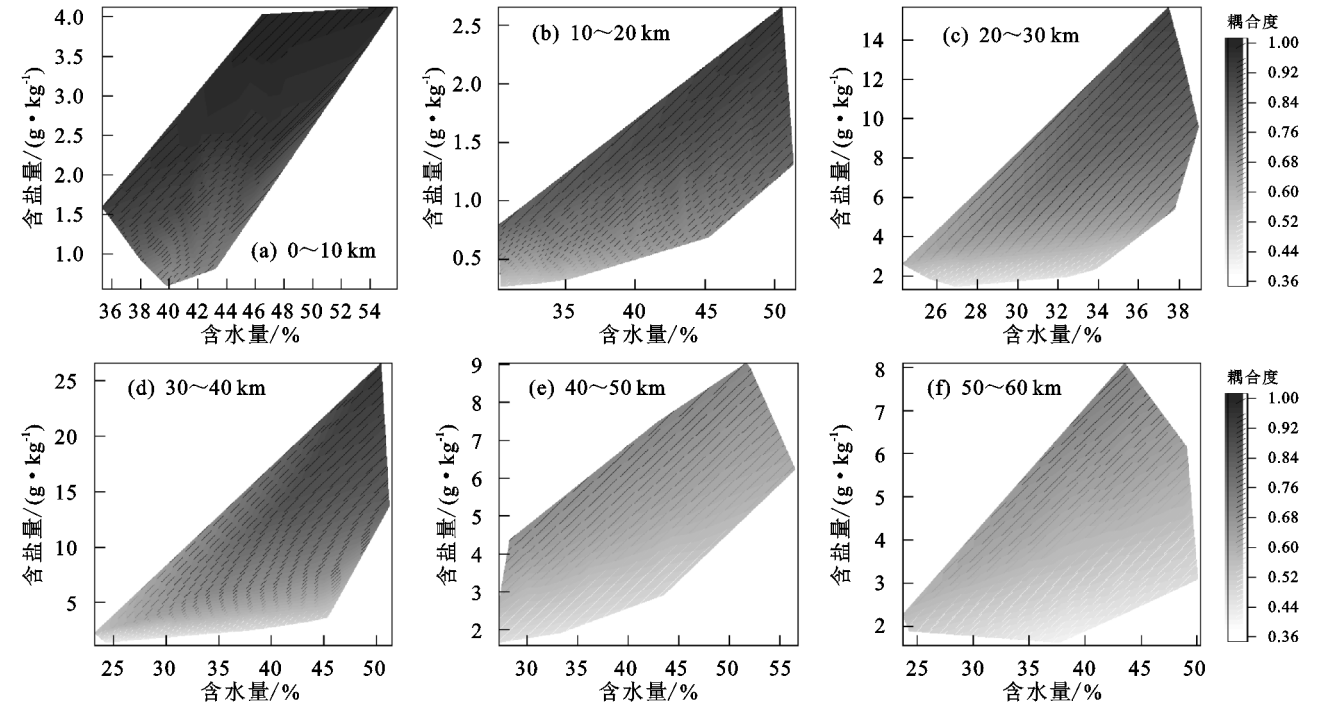


图 7 垦利区距海不同远近水盐耦合关系分析

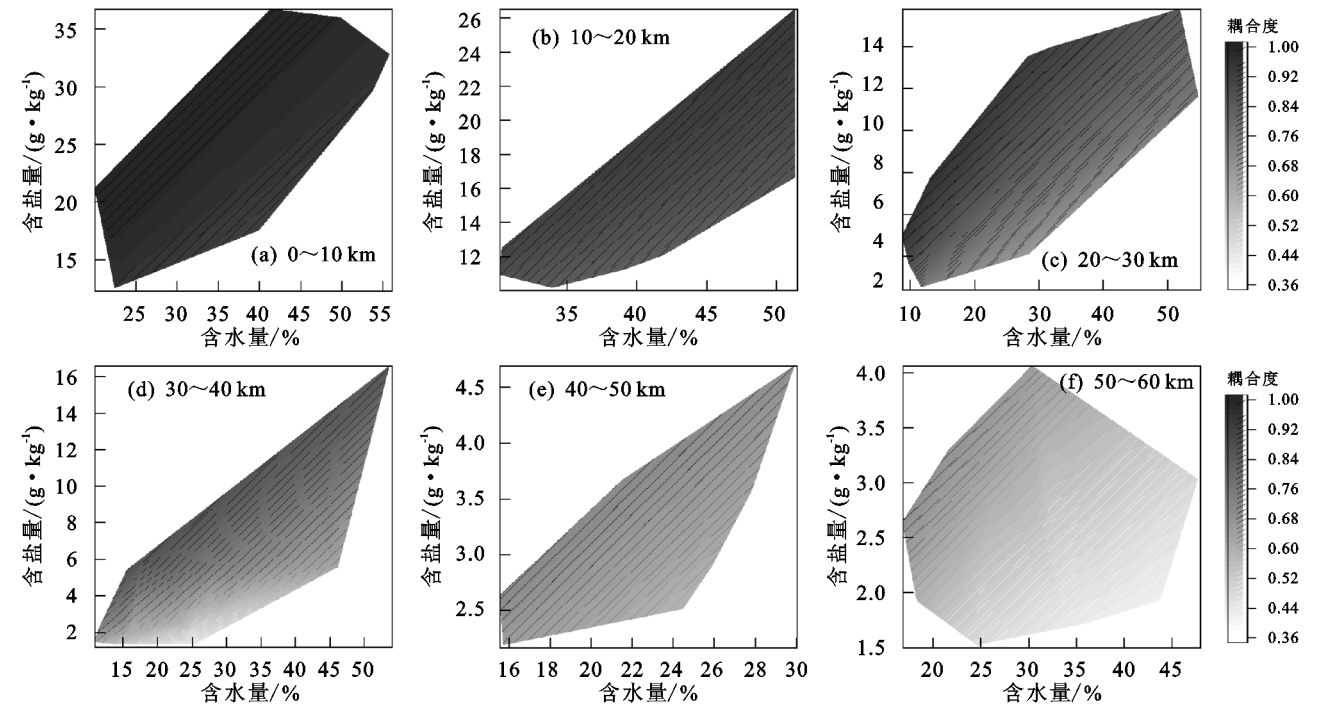


图 8 无棣县距海不同远近水盐耦合关系分析

(2)本文研究发现,不同适生植物能够对应不同土壤水盐环境。相对于其他季节,春秋季蒸发旺盛,水盐相关性较强,本文选取该季节探究得出的不同植被类型的水盐变异及耦合特征,与相关研究^[28]结论相同。一方面,显示滨海盐渍土地区不同植被类型对土壤

盐分含量的较好指示性;另一方面,显示了春秋积盐季节对土壤盐渍化的较高敏感性;这也可能是大量土壤盐渍化的相关研究选择春秋季节的原因^[29-30]。

本研究借助水盐耦合函数较好地分析研究区水盐耦合关系,表明春秋季、近海缓冲区、荒草地及光板

地土壤水盐含量均较高情况下,其水盐耦合度较高,而冬季、近内陆缓冲区、耕地土壤水盐含量均较低情况下,其水盐耦合度亦偏高,与水盐回归分析结果总体一致,证明该函数用于量化土壤水盐耦合关系的可行性。但黄三角濒海区独特复杂的自然条件和人为影响,其水盐耦合关系存在较大的时空差异性,需要更为细致和系统的研究,同时从土壤改良利用的角度,如何通过耦合度高低衡量水盐协调程度及进行水盐调控,亦需要进一步探究。

表 9 研究区距海远近不同情况下水盐回归分析

研究区	组号	距海 距离/km	回归 方程	决定 系数(R^2)
垦利区	1	0~10	$y=1.81x-56.08$	0.61
	2	10~20	$y=0.70x-18.86$	0.56
	3	20~30	$y=0.47x-12.13$	0.51
	4	30~40	$y=0.58x-14.28$	0.53
	5	40~50	$y=0.18x-2.86$	0.46
	6	50~60	$y=0.13x-1.20$	0.38
无棣县	1	0~10	$y=0.52x+3.71$	0.59
	2	10~20	$y=0.41x-1.96$	0.53
	3	20~30	$y=0.23x+1.01$	0.50
	4	30~40	$y=0.20x-0.30$	0.49
	5	40~50	$y=0.11x+0.64$	0.40
	6	50~60	$y=0.08x+0.85$	0.30

4 结 论

(1)黄三角濒海区土壤含盐量和含水量总体较高,土壤盐渍化属于中度盐渍化水平,垦利区盐化程度总体高于无棣县。盐分变异系数接近或为强变异,差异较大。土壤表层水盐含量呈显著的正相关,水盐耦合度、盐随水增加幅度及水盐决定系数因季节、植被、距海远近不同而存在较大的变异性。

(2)研究区不同季节、植被类型、距海远近的土壤含水量和含盐量具有明显的变化特征。不同季节盐分特征为春季>秋季>冬季>夏季,水分特征为夏季>春季>秋季>冬季;不同植被类型盐分特征为光板地>荒草地>耕地>林地,水分特征为荒草地>光板地>耕地>林地。土壤表层含盐量、含水量随着距离渤海渐远总体呈下降趋势,其中垦利土壤表层水盐含量在距海 30~40 km 和 40~50 km 处波动增加。

(3)研究区水盐耦合度季节排序为春>秋>冬>夏,盐随水增加而上升的幅度排序为秋>春>冬>夏,相关性排序为春>秋>冬>夏。水盐耦合度植被类型排序为光板地>荒草地>耕地>林地。盐随水增加而上升的幅度排序为光板地>荒草地>耕地>林地,水盐相关性排序为光板地>荒草地>耕地>林地。由近海到内陆,水盐耦合度、盐随水增加而上升

的幅度及水盐相关性呈现逐步下降趋势。垦利在距海 30~40 km 处,水盐耦合度和相关性波动上升。

参考文献:

[1] 解雪峰,濮励杰,沈洪运,等.滨海重度盐碱地改良土壤盐渍化动态特征及预测[J/OL].土壤学报,1-13[2021-12-11].

[2] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, Eastern China[J].Journal of Soils and Sediments, 2019,19,3699-3707.

[3] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.

[4] 窦旭,史海滨,苗庆丰,等.盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):246-253.

[5] 李光超.黄河三角洲土壤盐渍化研究综述[J].安徽农学通报,2020,26(增刊 1):113-115.

[6] Chamaki S N, Taghvaeian S, Zhang H L, et al. Soil salinity variations in an irrigation scheme during a period of extreme dry and wet cycles[J].Soil Systems,2019,3(2):35-50.

[7] Jacopo D, Renato M, Carla S, et al. Spatial-temporal variability of soil moisture: Addressing the monitoring at the catchment scale[J].Journal of Hydrology,2019,570:436-444.

[8] Naoki K, Katsuhide Y, Tadaharu I. Development of a practical model for predicting soil salinity in a salt marsh in the Arakawa River Estuary[J].Water,2021,13:e2054.

[9] Kaman H, Cetin M, Kirda C. Spatial and temporal evaluation of depth and salinity of the groundwater in a large irrigated area in southern Turkey [J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences,2016,53(2):503-510.

[10] 郭勇,尹鑫卫,李彦,等.农田一防护林一荒漠复合系统土壤水盐运移规律及耦合模型建立[J].农业工程学报,2019,35(17):87-101.

[11] 魏建涛,张建新,范文波,等.犁底层深度对膜下滴灌土壤水盐运移影响的模拟研究[J].土壤通报,2021,52(4):845-853.

[12] 吕真真,杨劲松,刘广明.黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J].土壤学报,2017,54(6):1377-1385.

[13] 马贵仁,屈忠义,王丽萍.基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J].水土保持学报,2021,35(4):208-216.

[14] 由国栋,虎胆·吐马尔白,邵丽盼·卡尔江,吴永涛,李卓然.膜下滴灌棉田冻融期土壤水分盐分变化特征[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):124-128.

[15] 赵亚楠,周玉蓉,王红梅.宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性[J].应用生态学报,2018,29(11):3577-3586.

玉米产量及生理指标的影响[J].草业学报,2019,28(10):156-165.

[19] 李锦,田霄鸿,王少霞,等.秸秆还田条件下减量施氮对作物产量及土壤碳氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):137-143.

[20] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.

[21] 吴得峰,姜继韶,孙棋棋,等.减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1202-1209.

[22] 郑利芳,吴三鼎,党廷辉,等.不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):221-227.

[23] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):48-55.

[24] 马星竹,郝小雨,高中超,等.氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响[J].玉米科学,2016,24(6):131-135.

[25] 赵靓,侯振安,黄婷,等.氮肥用量对玉米产量和养分吸收的影响[J].新疆农业科学,2014,51(2):275-283.

[26] 石德杨,张海艳,董树亭,等.土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):37-44.

[27] 胡希远, Kuehne R F.秸秆在土壤内分解初期氮素矿化与固持的模拟测定[J].应用生态学报,2005,16(2):243-248.

[28] 张成霞,南志标.土壤微生物生物量的研究进展[J].草业科学,2010,27(6):50-57.

[29] Zhang J S, Guo J F, Cheng G S, et al. Soil microbial biomass and its controls[J].Journal of Forestry Research,2005,16(4):327-330.

[30] 周建斌,陈竹君,李生秀,等.土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J].生态学报,2001,21(10):1718-1725.

[31] 周元,陈远学,蒋帆,等.玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应[J].水土保持学报,2020,34(2):173-180.

[32] 王芳,张金水,高鹏程,等.不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):702-709.

[33] 马想,黄晶,赵惠丽,等.秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1574-1580.

[34] 王萍萍,段英华,徐明岗,等.不同肥力潮土硝化潜能及其影响因素[J].土壤学报,2019,56(1):124-134.

[35] 朱国洁,张娜,杜雯,等.氨氧化微生物在氮循环中的生态功能及其影响因子[J].天津农业科学,2015,21(12):48-53.

(上接第 308 页)

[16] 周宏.现代汉语辞海[M].北京:光明日报出版社,2003.

[17] Valerie I. The Penguin Dictionary of Physics[M].Beijing: Foreign Language Press,1996:92-93.

[18] 张子璇,宋雨桐,张惠中,等.水文气候影响下黄河三角洲土壤盐分时空动态[J].应用生态学报,2021,32(4):1393-1405.

[19] 张素铭,赵庚星,王卓然,等.滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):349-358.

[20] 李萍.黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.

[21] 王卓然.黄河三角洲典型地区土壤水盐动态规律、影响因素与预测模型[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2017.

[22] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等.基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演[J].农业工程学报,2015,31(5):107-112.

[23] 巩腾飞.盐碱地植被覆盖度与土壤盐分含量时空耦合关系研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.

[24] 杨晓潇,王秀兰,王计平,等.天津市滨海新区土壤水盐空间变异分析[J].中国水土保持科学,2019,17(3):39-47.

[25] 王卓然,赵庚星,高明秀,姜曙千,常春艳,贾吉超.黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究:以垦利县为例[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):154-161.

[26] 杨强军,范燕敏,耿庆龙,等.焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究[J].新疆农业大学学报,2020,43(5):385-390.

[27] 王维维,麦麦提吐尔逊·艾则孜,艾提业古丽·热西提,等.焉耆盆地农田耕层土壤盐分的空间变异及分布格局[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):195-201.

[28] 李珊,杨越超,姚媛媛,等.不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J].土壤学报:2021,59(4):1012-1024.

[29] 胡盈盈,王瑞燕,陈红艳,等.黄河三角洲春秋两季土壤盐分遥感反演及时空变异研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(8):78-81.

[30] 孙亚楠,李仙岳,史海滨,等.基于多源数据融合的盐分遥感反演与季节差异性研究[J].农业机械学报,2020,51(6):169-180.