



赵铭,常春艳,王卓然,等.黄三角濒海区不同土层土壤盐分影响因素及预测模型[J].黑龙江农业科学,2023(2):23-34.

黄三角濒海区不同土层土壤盐分影响因素及预测模型

赵 铭,常春艳,王卓然,赵庚星

(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 271000)

摘要:摸清土壤盐分的影响因素是盐渍化土壤改良利用的重要基础。以黄河三角洲濒海垦利区为研究区,选取地下水、植被、地貌、离海距离 4 个方面的影响因子,确定了地下水埋深、地下水矿化度、植被类型、植被覆盖度、地貌类型、相对高程、离海距离 7 个指标,分析了各指标与土壤含盐量之间的关系,通过灰色关联分析法筛选出土壤盐分的主要驱动因子,进而构建了不同深度土层土壤含盐量的多元线性回归预测模型。结果表明,地下水埋深与各土层含盐量为指数函数负相关,植被覆盖度、相对高程和离海距离与各土层含盐量均为幂函数负相关,地下水矿化度与各土层含盐量呈指数函数正相关,且随着土层深度的增加各指标与含盐量的相关性逐渐减弱;各土层土壤盐分与各影响因子关联度的排序均为地下水矿化度>植被覆盖度>地下水埋深>相对高程>离海距离,土壤盐分的主要驱动因子一是地下水矿化度和埋深,二是地表植被覆盖度;基于地下水矿化度、植被覆盖度、地下水埋深三因子构建的 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm 土层土壤盐分的多元线性回归模型均为最佳盐分预测模型,模型的决定系数(R^2)分别为 0.742、0.777、0.794 和 0.828,均方根误差(RMSE)分别为 2.079 5、2.081 9、1.868 3 和 1.623 6,验证集的 R^2 分别为 0.712、0.756、0.813 和 0.883,RMSE 分别为 1.952 0、1.879 7、1.728 9 和 1.227 3。

关键词:黄河三角洲;不同土层;土壤盐分;影响因素;预测模型

土壤盐渍化是全球关注的热点问题之一。我国盐渍土分布广泛,面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占可利用土地总面积的 4.88%^[1]。黄河三角洲是濒海盐渍土集中分布区,该区由于长期海水的浸渍作用以及黄河水动力的影响,导致地下水埋深较浅,地下水矿化度较高^[2],再加上人类对土地的不合理开发利用,导致盐分的表聚现象严重,土壤盐渍化现象普遍,严重制约了当地的农业发展。正确有效地分析土壤盐分的影响因素,是探究盐渍化的关键,对科学利用盐渍土地资源具有现实意义。

众多学者对土壤盐渍化问题开展了大量的分析研究。从研究区域看,主要涉及内陆和濒海等不同区域,Pankova 等^[3]通过分析中亚沙漠的盐渍化成因,发现灌溉区域内表层土壤盐分聚积与气候密切相关。苏春利等^[4]通过对内蒙古的河套

灌区西部的盐渍化现状进行调查分析,探明了其研究区的盐渍化程度、类型及空间分布特征。王博^[5]从地下水动力学、遥感分析、统计学等多种方法对新疆喀什地区的盐渍化趋势进行分析;何宝忠等^[6]研究了新疆渭库绿洲地区的土壤时空变化特征,为该区的盐渍化治理提供依据;张添佑等^[7]采用 GIS、RS 方法对新疆玛纳斯河流域的土壤进行了动态分析。曹建荣等^[8]用灰色关联分析方法对黄河三角洲的盐渍化土壤建立了生态风险评价模型。总体看,针对内陆区域的土壤盐渍化研究相对较多,濒海区的相关研究仍需进一步加强。

从研究方法看,利用遥感技术进行土壤盐分的反演可以有效获取大范围的盐渍化分布特征,进而可分析含盐量与作物生长之间的响应关系。如黄权中等^[9]基于 Landsat 数据对土壤盐分进行反演,分析了土壤盐分与灌溉和埋深之间的关系。于海云等^[10]从微波遥感方面采用精细四级化雷达遥感数据对土壤盐渍化进行响应分析,监测结果理想。牛宝茹^[11]利用遥感图像提取水分来反演地下水埋深情况,再对盐渍化信息进行监测。Khajehzadeh 等^[12]利用遥感和 GIS 技术对伊朗地区的土壤盐分进行了预测。地统计分析法可以对土壤盐渍化进行定量分析,能较好地反映其时空

收稿日期:2022-08-09

基金项目:国家自然科学基金(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(SYL2017XTTD02)。

第一作者:赵铭(1996—),女,硕士研究生,从事农业工程与信息技术研究。E-mail:zml20258@163.com。

通信作者:常春艳(1985—),女,博士,讲师,从事土地资源利用研究。E-mail:chyan0103@sda.u.edu.cn。

特征。杨劲松等^[13]采用地统计学与传统统计学相结合的方法,对土壤盐分、含水量、pH的空间变异特征进行了研究。吐尔逊·艾山^[14]运用GIS、RS技术,并采用相关分析和地统计学结合的方法,对土壤盐分、矿化度等土壤特性进行分析,揭示土壤盐分时空变异特征。同时,地统计学中的Kriging插值法也常常用于土壤盐分的定量分析^[15-17]。由此,基于遥感及模型的定量分析已成为当前土壤盐渍化研究的主要方法。

从土壤盐渍化的影响因素看,不少学者对土壤盐渍化与各影响因素的关系进行了分析。如董莉丽等^[18]探究了盐渍化与土壤环境因子之间的关系,得出海拔高度与土地利用类型可以很好地解释盐渍化水平的结论。王瑞燕等^[19]认为在微地貌特征不同的条件下,表层的土壤盐分高于深层的土壤盐分。张子璇等^[20]分析了黄河三角洲土壤盐分与水文气候之间的关系,得出水文气候对盐分影响具有滞后性的结论。刘广明等^[21]研究表明在0~40 cm深度下的土壤电导率与地下水埋深、地下水矿化度具有显著的线性关系。另有研究表明地下水能够显著影响土壤盐分特征^[22-24]。张同娟等^[25]使用灰色关联分析法对耕层和犁底层的盐分影响因子进行了分析,结果表明地下水位是影响盐分最直接的因素。袁玉芸等^[26]对表层土壤盐分的影响因子进行分析,总结出主要影响因子为地下水埋深、高程和温度。整体看,多数研究都是对土壤盐分与单个或少数影响因素进行分析,针对典型区域土壤盐分影响因子的系统性分析讨论尚有待加强。

本研究选择黄河三角洲滨海盐渍区,拟定量分析土壤盐渍化的各个影响因素与土壤盐分之间的关系,进而筛选主要的影响因子并建立预测模型,为滨海区土壤盐渍化的改良利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取黄河三角洲垦利区为研究区,该区域位于黄河入海口,东濒渤海,具体区域位置为37°24'N~38°10'N, 118°15'E~119°19'E(图1)。属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,降水集中在6月—8月,年蒸发量大于降水量。地下水埋深较浅且矿化度较高,地形南高北低,地势自西南到东北呈扇状分布,植被分为天然植被和人工植被,其中天然植被

多为耐盐性植被。土地利用类型主要有耕地、林地、草地等,主要农作物有小麦、玉米、棉花等,总体管理粗放、产量较低。土壤类型多为滨海盐化潮土,土壤质地多为轻壤和砂壤,土壤中的盐分向上运移,返盐、脱盐现象频繁,土壤盐渍化普遍。

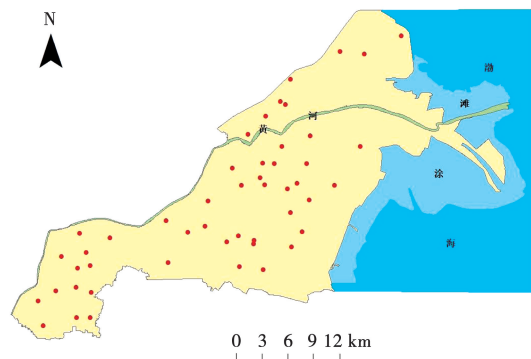


图1 研究区位置及采样点位

1.2 数据采集与处理

1.2.1 数据采集 本研究于2013年11月9日—11月11日进行了垦利区的野外调查采样工作,共设置47个观测点位(图1),每点位有多个观测样点。在野外调查中使用EC110便携式盐分计,对土层0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm和45~60 cm的土壤电导率进行了测定,并采集土壤样本,共获得不同土层深度土壤盐分108组样点数据。在对盐分进行记录的同时,记录每个样点的土地利用类型、植被类型等信息。

在第二次土壤普查的相关数据库中提取地下水埋深和矿化度数据;地貌类型及相对高程通过查阅历史资料及DEM数据确定;运用归一化植被指数(NDVI)^[27]对植被覆盖度进行估算;距海远近数据在ARCGIS中利用分析工具中的近邻分析计算采样点到海岸线的距离。

1.2.2 数据处理 对土壤样本进行室内自然风干、研磨过筛,采用烘干法测定土壤盐分含量,建立土壤电导率 EC_0 ($dS \cdot m^{-1}$)和土壤含盐量 $St(g \cdot kg^{-1})$ 之间关系模型: $St = 2.18EC_0 + 0.727$ ^[28]。利用模型进行电导率转换,最终得到所有样点土壤含盐量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 盐渍化程度和矿化度等级的划分 根据土壤含盐量($g \cdot kg^{-1}$)的高低,将滨海土壤盐渍化程度分为非盐渍土 $<1.0 g \cdot kg^{-1}$;轻度盐渍土 $1.0 \sim 2.0 g \cdot kg^{-1}$;中度盐渍土 $2.0 \sim 4.0 g \cdot kg^{-1}$;重度盐渍土 $4.0 \sim 10.0 g \cdot kg^{-1}$;盐土 $\geq 10.0 g \cdot kg^{-1}$ 。

根据地下水矿化度的高低,将地下水矿化度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)分为5个等级,分别是弱矿化水 $0.5\sim 2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;中矿化水 $2.0\sim 5.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;强矿化水 $5.0\sim 10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;盐水 $10.0\sim 30.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;高浓度盐水 $\geq 30.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3.2 不同深度土层土壤盐分对主要影响因素的响应 基于前期研究及实地调查,选取了地下水、植被、地貌、距海远近4个方面的影响因素,确定了7个土壤盐分的指标,其中包括5个定量指标(地下水埋深、地下水矿化度、植被覆盖度、相对高程、离海距离)和2个定性指标(植被类型、地貌类型)。采用统计分析方法分析各定性指标与土壤盐分的关系,分别以5个定量指标为自变量, $0\sim 15\text{ cm}$ 、 $15\sim 30\text{ cm}$ 、 $30\sim 45\text{ cm}$ 、 $45\sim 60\text{ cm}$ 土层的土壤含盐量为因变量,采用SPSS 19.0软件分别构建各自变量与因变量之间的函数,并绘制其函数拟合图,分析土壤盐分对各因素的定量响应。

1.3.3 不同影响因素影响程度的确定及驱动因子筛选 采用灰色关联分析法对影响因素进行关联度排序,确定不同土层土壤盐分影响因素影响程度的强弱。具体步骤为:确定子序列和母序列;对子序列和母序列的数据进行无量纲化处理;计算灰色关联系数;计算关联度;关联度排序。

选用5个定量指标进行土壤盐分与影响因素的关联度分析,以地下水埋深、地下水矿化度、植被覆盖度、相对高程、离海距离为 $x_1\sim x_5$ 的子序列,垦利区 $0\sim 15\text{ cm}$ 、 $15\sim 30\text{ cm}$ 、 $30\sim 45\text{ cm}$ 、 $45\sim 60\text{ cm}$ 的土壤含盐量 x_0 为母序列,对影响因素与土壤盐分的影响程度进行分析。根据关联度排序结果从中选取土壤盐分的驱动因子,进行盐分预测模型的构建。

1.3.4 不同深度土层土壤盐分预测模型的建立 考虑应用层面的简便及可操作性,本研究采用常用的多元线性回归方法构建不同土层土壤盐分预测模型。该方法是根据筛选出的土壤盐分驱动因子,分析因变量(土壤盐分)与多个自变量(驱动因子)之间的关系,构建土壤盐分多元线性回归定量预测模型。

选取2/3总样本数据作为建模集,构建土壤盐分预测模型,1/3总样本数据作为验证集,将模型得到的盐分预测值与盐分实际值进行函数分析,采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)两个指标对模型精度进行评价,精度误差限定在20%以内,均方根误差(RMSE)限定于 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤盐分的主要影响因素分析

2.1.1 地下水埋深对土壤盐分的影响 由图2可以看出,地下水埋深有一定的差异,埋深为 $1\sim 2\text{ m}$ 的区域面积比例为40.21%,集中分布东部沿海和西南部沿黄区域;埋深为 $2\sim 3\text{ m}$ 的区域面积比例为43.18%,在研究区广泛分布;埋深为 $3\sim 4\text{ m}$ 的区域面积比例为16.62%,主要分布研究区南部、西南部和东北部黄河两侧。

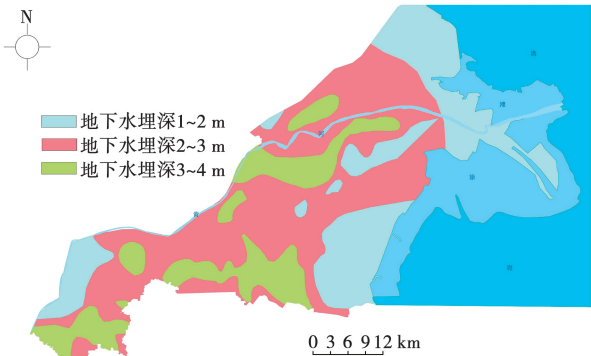


图2 垦利区地下水埋深分布图

由表1可以看出,不同地下水埋深的土壤盐分含量有着明显差异,埋深在 $1\sim 2\text{ m}$ 的土体含盐量均值为 $10.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,埋深为 $2\sim 3\text{ m}$ 时土体盐分均值为 $5.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,埋深为 $3\sim 4\text{ m}$ 时土体盐分均值为 $4.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同一土层深度下,随着地下水埋深的增加土壤含盐量均呈逐渐减少趋势,说明土体中土壤盐分表聚现象明显,土壤盐分呈现“T”字型分布;当埋深一定时,埋深较浅的地下水位下($1\sim 2\text{ m}$ 、 $2\sim 3\text{ m}$),土壤含盐量呈现随土层深度的增加而递减的趋势,而埋深较深的地下水位下($3\sim 4\text{ m}$),土壤盐分则呈现上轻下重的特征,反映了地下水位高低对土体盐分分布的不同影响。

表1 不同地下水埋深不同土层土壤含盐量统计

地下水埋深/m	含盐量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
	0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	45~60 cm	平均值
1~2	11.19	10.36	9.49	9.00	10.01
2~3	4.46	5.02	5.49	6.02	5.25
3~4	3.47	4.11	4.65	5.19	4.36

将不同土层深度的土壤含盐量与地下水埋深进行函数关系拟合,由图3可以看出,研究区不同深度土层土壤含盐量与地下水埋深的相关性较好,均呈指数函数关系,二者为负相关,即地下水

埋深越浅,土壤含盐量越高;地下水埋深越深,土壤含盐量越低。当地下水埋深较浅为1~2 m时,含盐量变化幅度较大,埋深对不同土层深度的土壤盐分影响较大,当地下水埋深>2 m时,地下水埋深对不同土层深度的土壤盐分影响趋缓、变小。不同土层土壤含盐量与地下水埋深函数方程

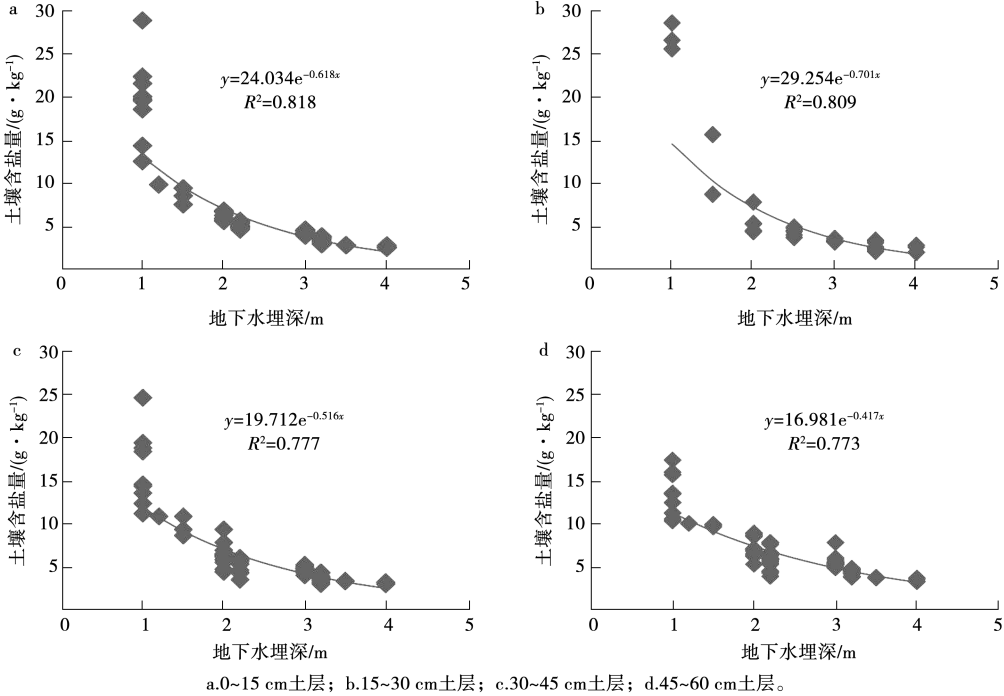


图 3 土壤含盐量与地下水埋深函数拟合

2.1.2 地下水矿化度对土壤盐分的影响 由图 4 可以看出,地下水矿化度分布整体上表现为由西向东逐渐升高的趋势,并且距海越近矿化度越高。垦利区盐水分最广泛,面积比例为 47.08%,其次是中矿化水,面积比例为 27.57%,再是强矿化水,面积比例为 18.11%,高浓度盐水和弱矿化水分布较少,面积比例分别是 8.45%和 4.80%。

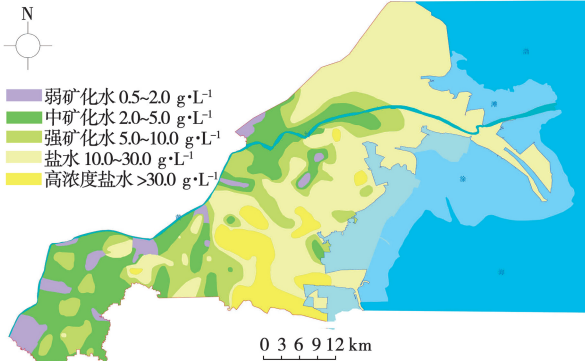


图 4 垦利区地下水矿化度分布图

分别为 0~15 cm: $y=24.034e^{-0.618x}$, $R^2=0.818$; 15~30 cm: $y=29.254e^{-0.701x}$, $R^2=0.809$; 30~45 cm: $y=19.712e^{-0.516x}$, $R^2=0.777$; 45~60 cm: $y=16.981e^{-0.417x}$, $R^2=0.773$ 。随土层深度的增加,方程 R^2 为递减趋势,说明其拟合效果表层优于下层。

由表 2 可以看出,地下水矿化度高低直接影响土体盐分含量,高浓度盐水土体含盐量最高,均值为 $15.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;其次是盐水,土体含盐量均值为 $10.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;强矿化水土体含盐量均值为 $5.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;中矿化水和弱矿化水的土壤含盐量均值为 4.19 和 $3.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在同一矿化度类型下,土壤盐分均随着土层深度的增加呈现逐渐升高的趋势,说明离地下水更近的深层土壤盐分含量高于表层。

表 2 不同矿化度类型不同土层土壤含盐量统计

矿化度 类型	含盐量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
	0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	45~60 cm	平均值
弱矿化水	2.40	2.95	3.47	3.89	3.18
中矿化水	3.28	3.96	4.50	5.03	4.19
强矿化水	4.20	4.96	5.51	6.21	5.22
盐水	8.93	9.38	10.18	11.77	10.07
高浓度盐水	12.30	14.32	16.87	17.82	15.33

将不同土层深度的土壤含盐量与地下水矿化度进行函数关系拟合,由图 5 可知,土壤含盐量与地下水矿化度的相关性较好,各土层均呈指数函数关系,二者为正相关,即地下水矿化度越高,土壤含盐量越高。在矿化度 $<20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的相对较低的范围内,随着矿化度的增加各土层土壤盐分呈缓慢增加的趋势,而当地下水矿化度超过 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤盐分则呈快速升高的趋势,表明矿化度越高,积

盐越明显。不同土层土壤含盐量与地下水矿化度的函数方程分别为 $0\sim15\text{ cm}$: $y=2.3968\text{e}^{0.0566x}$, $R^2=0.873$; $15\sim30\text{ cm}$: $y=3.1456\text{e}^{0.0706x}$, $R^2=0.859$; $30\sim45\text{ cm}$: $y=3.7465\text{e}^{0.0567x}$, $R^2=0.827$; $45\sim60\text{ cm}$: $y=4.3946\text{e}^{0.0519x}$, $R^2=0.792$ 。随土层深度的增加,方程 R^2 为递减趋势,说明矿化度对表层土壤含盐量的影响优于下层。

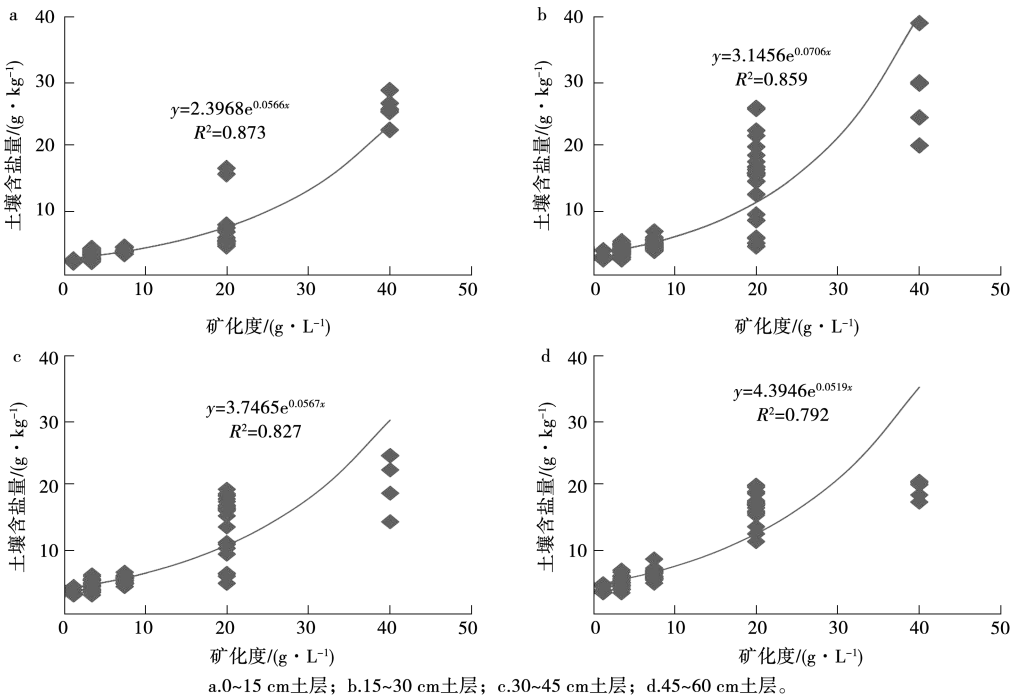


图 5 土壤含盐量与地下水矿化度函数拟合

2.1.3 植被类型对土壤盐分的影响 由表 3 可知,按照土壤含盐量的高低,植被类型排序为光板地>碱蓬>茅草>芦苇>棉花>水稻>玉米>小麦,其中荒地的盐分含量远高于耕地的盐分含量。

表 3 不同植被类型不同土层土壤含盐量统计

植被类型			含盐量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
			0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	45~60 cm	均值
耕地	小麦	95	2.31	2.82	3.41	3.85	3.10
	水稻	55	3.30	3.87	4.21	4.86	4.06
	玉米	98	2.53	3.01	3.54	4.02	3.28
	棉花	45	4.22	5.03	5.64	6.20	5.27
荒地	茅草	75	6.41	7.50	8.54	9.81	8.07
	芦苇	35	5.70	6.62	8.02	9.10	7.36
	碱蓬	15	21.11	17.05	13.84	11.30	15.83
	光板地	5	31.32	25.54	19.20	14.83	22.72

耕地的农作物中棉花的土壤含盐量最高,表现为较强的耐盐性,土体盐分均值为 $5.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为中重度盐渍程度;水稻土体盐分均值为 $4.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为中度盐渍程度,表现为较好的耐盐性;玉米和小麦土体含盐量均值分别为 3.28 和 $3.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为轻度盐渍程度,耐盐性相对较差,说明不同的作

物耐受的土壤盐分含量范围不同,应根据土壤的盐分状况合理安排作物。在同一植被类型下,土壤盐分均随着土层深度的增加逐渐升高,说明耕地土壤深层盐分高于表层。

荒地中光板地积盐明显,表层土壤(0~15 cm)中的盐分含量高达 $31.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土体均值为 $22.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;碱蓬是典型的盐碱植物,其土体含盐量均值为 $15.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,也高于其他植被的土壤含盐量;茅草和芦苇亦为一定程度的耐盐植物,土体含盐量均值分别为 8.07 和 $7.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。碱蓬和光板地随着土层深度的增加盐分含量呈现逐渐降低的趋势,而茅草和芦苇的盐分变化规律则与之相反。同时荒地中有植被覆盖的土壤盐分含量明显低于光板地,说明荒地上种植一些适宜的耐盐碱植物可有效减少地表蒸发、降低土壤的含盐量。

2.1.4 植被覆盖度对土壤盐分的影响 各植被类型的植被覆盖度见表 3,耕地的植被覆盖度总体高于荒地,覆盖度由高到低依次是玉米>小麦>茅草>水稻>棉花>芦苇>碱蓬>光板地,玉米和小麦的覆盖度最高,都在 95% 以上,荒地中茅草的覆盖度相对较高,为 75%,光板地覆盖度最

低,其表面几乎无植被覆盖。

将不同土层深度的土壤含盐量与植被覆盖度进行函数关系拟合,由图 6 可以看出,土壤含盐量与植被覆盖度的相关性较好,各土层均呈幂函数关系,二者为负相关,即植被覆盖度越低,土壤含盐量越高。当植被覆盖度较低(0%~35%)时,土层深度 0~15 cm 和 15~30 cm 的土壤盐分含量随着植被覆盖度的增加下降趋势明显,当土层深度为 30~45 cm 和 45~60 cm 时,随植被覆盖度增加的土壤含盐量下降趋势变缓,说明植被覆盖对表层土壤盐分的影响更大。当植被覆盖度高于 35% 时,土壤含盐量变化趋于稳定,说明增加植被覆盖,可有效降低土壤含盐量,当覆盖度高至一定程度(约 50%),其抑盐效果则增加趋缓。不同深度土层土壤含盐量与植被覆盖度函数方程分别为 0~15 cm: $y = 2.1219x^{-0.961}$, $R^2 = 0.831$; 15~30 cm: $y = 2.7755x^{-0.797}$, $R^2 = 0.830$; 30~45 cm: $y = 3.4813x^{-0.628}$, $R^2 = 0.782$; 45~60 cm: $y = 4.1393x^{-0.481}$, $R^2 = 0.781$ 。随土层深度的增加,方程 R^2 为递减的趋势,同样说明植被覆盖对表层土壤盐分的影响程度高于下层。

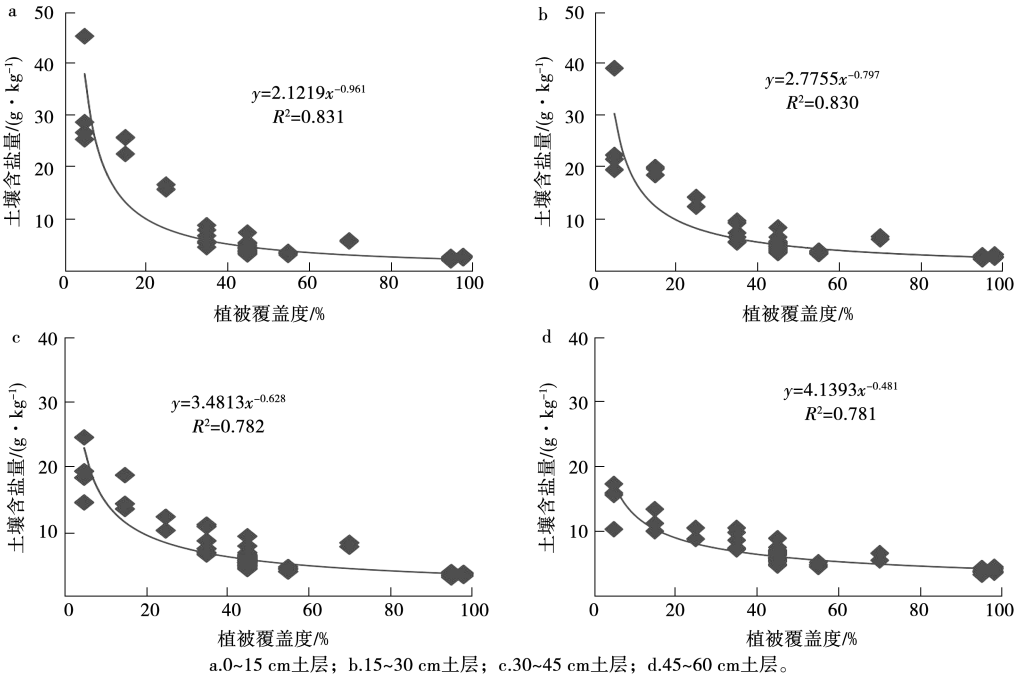


图 6 土壤含盐量与植被覆盖度函数拟合

2.1.5 地貌类型对土壤盐分的影响 图 7 是垦利区地貌类型分布图,其中面积最大的地貌类型是微斜平地,占研究区总面积 38%;其次是海滩地,占比 29%;河滩高地、洼地所占比例分别为 23%和 8%;缓岗所占比例最小,为 3%。

由表 4 可以看出,不同地貌类型的土壤含盐量的排序为:海滩地>洼地>微斜平地>缓岗>河滩高地,呈现出地势相对较高的地貌类型其土壤盐分含量相对较低的趋势。

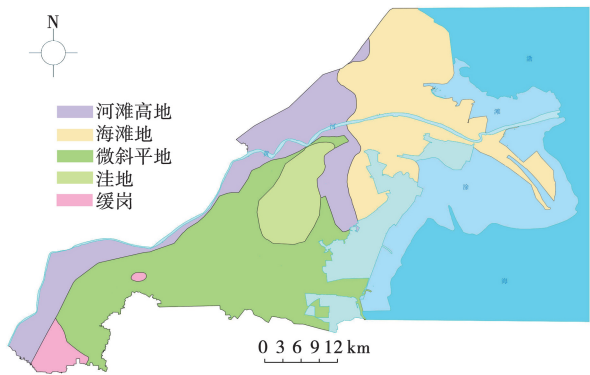
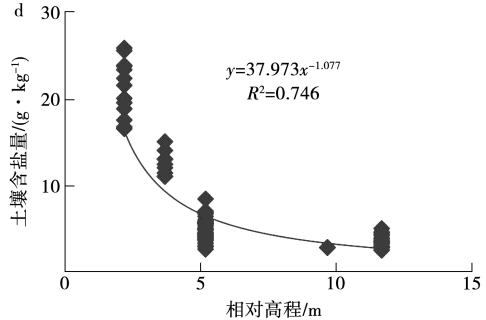
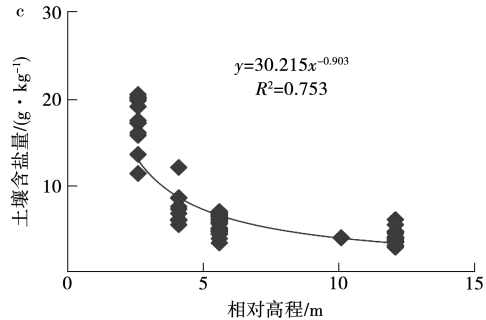
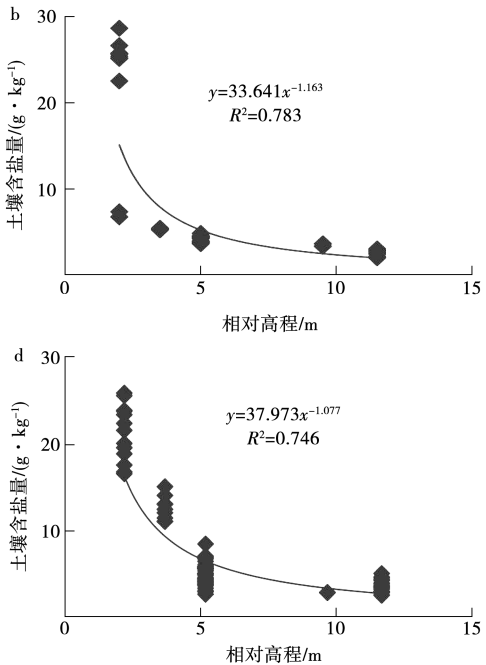
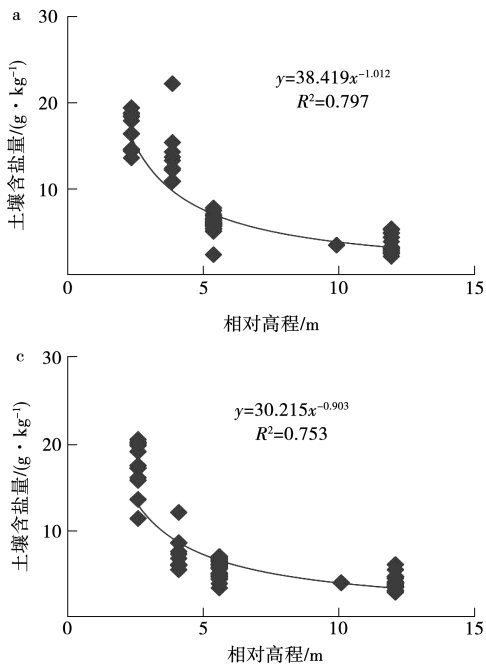


图 7 不同地貌类型分布图

海滩地土体盐分均值高达 20.91 g·kg⁻¹,为盐土水平,与其分布离海近,长期受海水浸渍有关;洼地的土体盐分均值为 11.01 g·kg⁻¹,由于其地势较低,地下水埋深低,较易积盐,土壤盐分较高;微斜平地土体盐分均值为 8.19 g·kg⁻¹,土壤盐分相对较高;缓岗与河滩高地的土体盐分均值分别为 4.14 和 3.72 g·kg⁻¹,其表层盐分分别为 3.01 和 3.53 g·kg⁻¹,因地势较高,盐分不易到达地表,二者盐渍化程度相对较低。其中微斜平地、海滩地、河滩高地和缓岗总体表现为随着土层深度的增加土壤含盐量也逐渐增加,呈现为上轻下重的趋势,而洼地的土体盐分层次变化特征则不明显。



a.0~15 cm土层; b.15~30 cm土层; c.30~45 cm土层; d.45~60 cm土层。

图 8 土壤含盐量与相对高程函数拟合

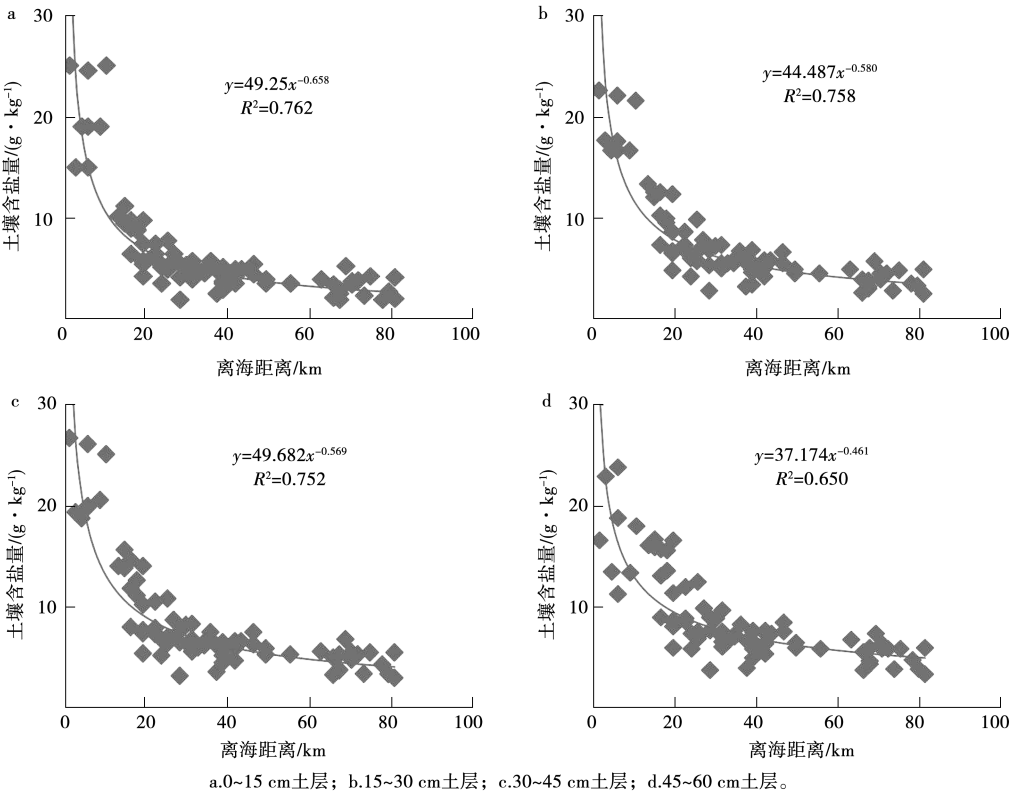
表 4 不同地貌类型不同土层土壤含盐量统计

地貌 类型	含盐量/(g·kg ⁻¹)				
	0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	45~60 cm	平均值
微斜平地	7.73	8.08	8.11	8.87	8.19
河滩高地	3.53	3.99	3.61	3.76	3.72
海滩地	18.77	19.97	21.57	23.57	20.91
洼地	10.47	11.20	10.94	11.44	11.01
缓岗	3.01	4.15	4.91	4.49	4.14

2.1.6 地貌相对高程对土壤盐分的影响 各地貌类型的相对高程分别为河滩高地 11.5 m,缓岗 9.5 m,微斜平地 5.0 m,洼地 3.5 m,海滩地 2.0 m。将不同土层深度的土壤含盐量与相对高程进行函数关系拟合,由图 8 可以看出,土壤含盐量与相对高程的相关性较好,各土层均呈幂函数关系,二者为负相关,即相对高程越低,土壤含盐量越高。在相对高程 0~5 m 范围内,土壤盐分含量变化明显,高程对不同土层深度的盐分影响较大,当相对高程 >5 m 时,随着高程的增加盐分含量变化趋于稳定。不同土层土壤含盐量与相对高程函数方程分别为 0~15 cm: $y=38.419x^{-1.012}$, $R^2=0.797$; 15~30 cm: $y=33.641x^{-1.163}$, $R^2=0.783$; 30~45 cm: $y=30.215x^{-0.903}$, $R^2=0.753$; 45~60 cm: $y=37.973x^{-1.077}$, $R^2=0.746$ 。随土层深度的增加,方程 R^2 为递减趋势,说明其拟合效果表层优于下层。

2.1.7 离海距离对土壤盐分的影响 将不同深度土层的土壤含盐量与离海距离进行函数关系拟合,由图 9 可以看出,土壤含盐量与离海距离呈幂函数递减的规律,二者相关性较好。即距海越近,土壤含盐量越高,反之亦然。离海距离 10 km 内土壤盐分含量高,最高可达 $26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且随离海距离增加土壤盐分含量大幅下降,呈现距海越近土壤盐分越高的现象。随着离海距离的进一步增大(大于

25 km),土壤盐分下降趋势显著,之后趋于稳定,由 $10\sim15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降到 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之下。不同土层土壤含盐量与离海距离函数方程分别为 $0\sim15\text{ cm}$: $y=49.25x^{-0.658}$, $R^2=0.762$; $15\sim30\text{ cm}$: $y=44.487x^{-0.580}$, $R^2=0.758$; $30\sim45\text{ cm}$: $y=49.682x^{-0.569}$, $R^2=0.752$; $45\sim60\text{ cm}$: $y=37.174x^{-0.461}$, $R^2=0.650$ 。随土层深度的增加,方程 R^2 为递减趋势,说明其拟合效果表层优于下层。



a.0~15 cm土层; b.15~30 cm土层; c.30~45 cm土层; d.45~60 cm土层。

图 9 土壤含盐量与离海距离函数拟合

2.2 不同深度土层土壤盐分驱动因子的筛选

表 5 为不同深度土层土壤含盐量与其主要影响因子指标的关联度排序,结果为地下水矿化度>植被覆盖度>地下水埋深>相对高程>离海距离,不同深度土层的关联度排序结果均完全一致,同时,随着土层深度的增加,各指标的关联度均逐

渐减小,说明各指标对表层土壤盐分的影响高于下层土壤,随着土层深度的加深,影响作用减小。由此可以看出,影响土壤盐分含量最重要的因素一是地下的潜水矿化度和埋深,二是地表的植被覆盖度。

表 5 影响因子指标关联度排序

评价项	排序	关联度			
		0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	45~60 cm
地下水矿化度 x_2	1	0.843	0.810	0.779	0.767
植被覆盖度 x_3	2	0.773	0.750	0.743	0.725
地下水埋深 x_1	3	0.766	0.737	0.717	0.703
相对高程 x_4	4	0.746	0.719	0.711	0.685
离海距离 x_5	5	0.725	0.694	0.681	0.658

2.3 不同深度土层土壤盐分的预测模型

为筛选关键因子及最佳模型,本研究首先将关联度最高的地下水矿化度选为土壤盐分预测模型的驱动因子,根据关联度排序结果,依次递加影响因子指标,构建土壤盐分的预测模型,从中筛选最佳指标和模型。

对建模集的土壤盐分指标地下水矿化度 x_2 、植被覆盖度 x_3 、地下水埋深 x_1 、相对高程 x_4 、离海

距离 x_5 依次进行回归分析,不同土层深度的建模指标的決定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)如表 6 所示。可以看出,在不同深度土层下,当建模指标为 x_2 、 x_3 、 x_1 时,各土层盐分模型決定系数(R^2)均相对最高,且均方根误差(RMSE)均在误差范围内。即选用地下水矿化度 x_2 、植被覆盖度 x_3 、地下水埋深 x_1 这 3 个指标构建不同土层深度下的土壤盐分预测模型效果最佳。

表 6 不同深度土层建模指标的 R^2 和 RMSE

建模指标	0~15 cm		15~30 cm		30~45 cm		45~60 cm	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
x_2	0.509	2.9338	0.637	2.5016	0.576	2.7350	0.661	2.3251
x_2, x_3	0.710	2.2078	0.731	2.2961	0.783	1.9369	0.792	1.8053
x_2, x_3, x_1	0.742	2.0795	0.777	2.0819	0.794	1.8683	0.828	1.6236
x_2, x_3, x_1, x_4	0.739	2.0704	0.773	2.0802	0.790	1.8681	0.825	1.6233
x_2, x_3, x_1, x_4, x_5	0.734	2.0645	0.772	2.0881	0.785	1.8672	0.822	1.6214

表 7 为以筛选的地下水埋深、地下水矿化度、植被覆盖度为自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 ,以不同土层深度的土壤含盐量为因变量 y ,建立的 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm 土层的土壤盐分最佳预测模型。不同土层深度建模集的 R^2 分别为 0.742,0.777,0.794 和 0.828,可以看出随着土层

深度的加深,決定系数 R^2 逐渐变大,说明模型的拟合精度深层优于表层。验证集的 R^2 分别为 0.712,0.756,0.813 和 0.883, RMSE 分别为 1.952 0,1.879 7,1.728 9 和 1.227 3,底层的拟合效果最好。

表 7 各土层土壤盐分最佳预测模型

土层/cm	表达式	建模集		验证集	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
0~15	$y=10.685-1.416x_1+0.182x_2-0.058x_3$	0.742	2.0795	0.712	1.9520
15~30	$y=11.626-1.221x_1+0.163x_2-0.069x_3$	0.777	2.0819	0.756	1.8797
30~45	$y=14.079-0.862x_1+0.113x_2-0.109x_3$	0.794	1.8683	0.813	1.7289
45~60	$y=14.935-1.173x_1+0.105x_2-0.108x_3$	0.828	1.6236	0.883	1.2273

图 10 和图 11 为不同土层土壤盐分实际值与预测值的函数拟合效果,二者显著相关且拟合效果较好,模型的预测精度高,说明筛选的驱动因子

与土壤盐分之间构建的多元回归方程有意义,可以使用多元线性回归来对研究区的土壤盐分进行预测。

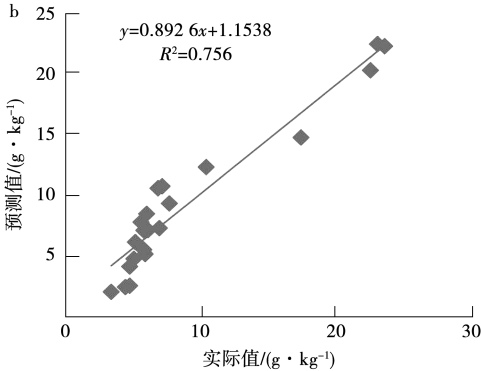
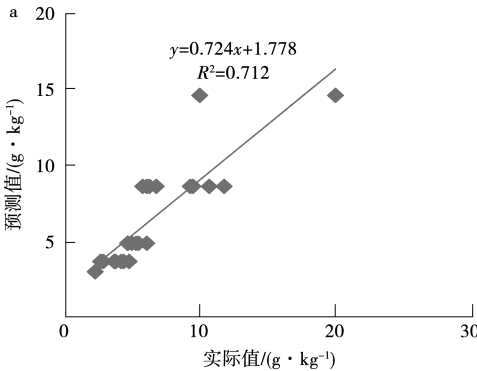


图 10 0~15 cm 土层(a)和 15~30 cm 土层(b)预测值与实际值的函数拟合

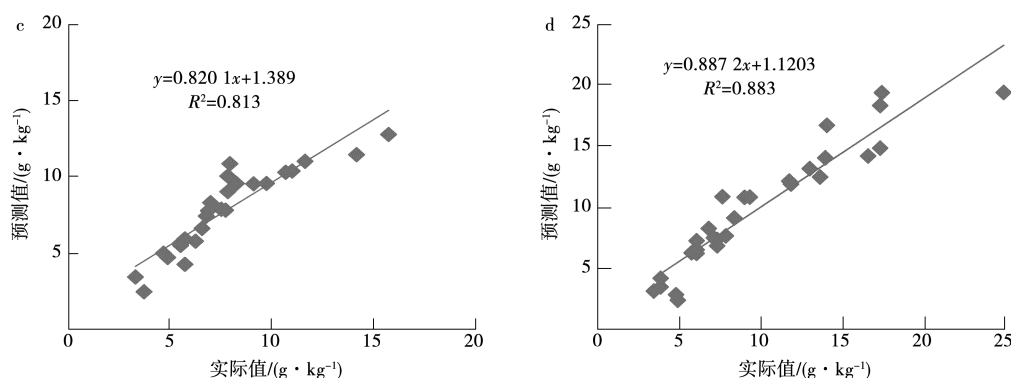


图 11 30~45 cm 土层(a)和 45~60 cm 土层(b)预测值与实际值的函数拟合

3 讨论

滨海区土壤盐分具有较明显的季节变化特征,在对黄河三角洲土壤盐渍化季节性变化的研究中,王君^[29]通过对 2019 年的土壤盐分数据进行分析,发现春季的盐渍化程度高于秋季。胡盈盈等^[30]选用 2013 年 4 月和 11 月的数据得出春季的盐渍化程度高于秋季。付腾飞^[31]使用 2011 年 4 月和 11 月的土壤盐分数据,得出秋季土壤盐渍化程度高于春季。由此看出,选择不同时期的盐分数据,得到的最终结果有所差异,但黄河三角洲的土壤盐分总体呈现春秋季积盐、夏季脱盐、冬季稳定的规律,其中秋季处于蒸发为主的积盐期,且气候和蒸发相对稳定,能够很好地反映研究区的土壤盐分特征。

滨海区影响土壤盐渍化的因素有多种^[32-34],本研究中盐分的主要影响因素与前人的研究结果一致^[32-35],范晓梅等^[36]研究认为黄河三角洲原生土壤盐渍化的主要影响因子是地下水位、矿化度和植被覆盖度,与本研究的结果完全相同,说明了地下水和植被覆盖与土壤盐分的密切关系。研究区地下水埋深普遍较浅,土壤的毛细作用强烈,因此地下水矿化度高的区域对土壤盐分的输送补给也较多^[36],极易导致水分蒸发后的地表盐分聚集。而地表植被覆盖度的增加,可有效减少土壤中的水分蒸发,使土壤积盐程度减轻,因此,控制高矿化的地下水深度及增加植被覆盖度,是防止黄河三角洲土壤盐渍化的有效方法。

黄河三角洲处于河海交汇的独特区位,该地区东濒渤海,经常受到风暴潮的侵袭,造成沿海地区的海水入侵及土壤盐分积聚,加重了土壤盐渍化程度^[37-39]。因此,距海远近也是影响土壤盐分的不可忽视的因素,可以通过建立海水入侵的监测网络,加强对海水入侵的监测和调控。

在进行不同深度土层盐分的预测模型的构建时,考虑应用层面的简便及可操作性,本研究选取

了多元线性回归模型,这是一种简单且有效的数学模型,结果显示其对土壤盐分有较好的预测效果。本研究在构建预测模型的基础上,后续将尝试构建多种模型,并进行精度比较,进一步筛选精度更高的土壤盐分预测模型。

4 结论

各因子对土壤盐分的影响中,地下水矿化度与土壤盐分的相关性最高,二者为正相关指数函数关系;离海距离与土壤盐分相关性最低,为负相关幂函数关系;各土层土壤盐分与地下水埋深均为负相关指数函数关系,与相对高程和植被覆盖度均为负相关幂函数关系。各因子与表层土壤盐分的相关性最高,随着土层深度增加,相关性逐渐下降。土壤含盐量从高到低的植被类型依次为光板地>碱蓬>茅草>芦苇>棉花>水稻>玉米>小麦;土壤含盐量从高到低的地貌类型依次为海滩地>洼地>微斜平地>缓岗>河滩高地。

各土层土壤盐分与各影响因子关联度的排序均为地下水矿化度>植被覆盖度>地下水埋深>相对高程>离海距离,随着土层深度的增加,各因子的关联度均逐渐减小。影响各土层土壤盐分含量最重要的因素一是地下的潜水矿化度和埋深,二是地表的植被覆盖度。

基于地下水矿化度、植被覆盖度、地下水埋深三因子构建的 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm 土层土壤盐分的多元线性回归模型预测精度均最高,模型的建模集 R^2 分别为 0.742, 0.777, 0.794 和 0.828, RMSE 分别为 2.079 5, 2.081 9, 1.868 3 和 1.623 6,验证集的 R^2 分别为 0.712, 0.756, 0.813 和 0.883, RMSE 分别为 1.952 0, 1.879 7, 1.728 9 和 1.227 3,可以用来对研究区的土壤盐分进行预测。

本研究对黄河三角洲滨海区土壤盐分的影响因素进行了系统性分析,筛选了土壤盐渍化的主

要驱动因子,构建了土壤盐分预测模型,可为黄河三角洲土壤盐渍化调控及农业发展提供决策依据。

参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008(5):837-845.
- [2] 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(Z1):113-115.
- [3] PANKOVA E I, KONYUSHKOVA M V. Climate and soil salinity in the deserts of Central Asia[J]. Eurasian Soil Science, 2013, 46(7): 721-727.
- [4] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):916-923.
- [5] 王博. 喀什噶尔河流域平原区地下水系统特征和生态环境演化分析[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2021.
- [6] 何宝忠, 丁建丽, 刘博华, 等. 渭库绿洲土壤盐渍化时空变化特征[J]. 林业科学, 2019, 55(9):185-196.
- [7] 张添佑, 王玲, 韩燕, 等. 基于 GIS 和 RS 的玛纳斯河流域土壤盐渍化敏感性动态评价[J]. 土壤, 2017, 49(4):812-818.
- [8] 曹建荣, 徐兴永, 于洪军, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化原因分析与生态风险评价[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4):508-516.
- [9] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):102-109.
- [10] 于海云, 王志军, 李彪, 等. 内蒙古河套灌区融解期土壤盐分多极化雷达响应分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11):19-24.
- [11] 牛宝茹. 塔里木河上游表土积盐量遥感信息提取研究[J]. 土壤学报, 2005(4):674-677.
- [12] KHAJEHZADEH M, AFZALI S F, HONARBAKHS H A, et al. Remote sensing and GIS-based modeling for predicting soil salinity at the watershed scale in a semi-arid region of southern Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(5):1-10.
- [13] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2007(3):348-353.
- [14] 吐尔逊·艾山. 渭库绿洲盐渍化土壤与地下水特征时空变化研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2012.
- [15] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. 资源科学, 2014, 36(2):321-327.
- [16] 段梦琦, 张晓光, 王豹. 黄河三角洲典型区土壤盐分空间分布预测方法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(8):243-250.
- [17] 徐英, 葛洲, 王娟, 等. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):123-130.
- [18] 董莉丽, 郭玲霞. 青海黄河沿岸土壤盐分特征及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(4):882-888.
- [19] 王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 等. 黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19):132-141.
- [20] 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.
- [21] 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J]. 土壤学报, 2003(1):65-69.
- [22] 赵自国, 赵凤娟, 夏江宝, 等. 地下水矿化度对黄河三角洲柽柳光合及耗水特征的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2588-2600.
- [23] 宋战超, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同地下水矿化度条件下柽柳土柱的水盐分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(2):41-48.
- [24] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9):2423-2430.
- [25] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于灰色关联度法河口地区土壤盐分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):793-796.
- [26] 袁玉芸, 瓦哈甫·哈力克, 关靖云, 等. 基于 GWR 模型的于田绿洲土壤表层盐分空间分异及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3273-3282.
- [27] 侯金鑫, 王德, 肖鲁湘, 等. 地下水埋深对土壤水盐、植被影响研究进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2019, 35(2):150-156.
- [28] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4):1040-1049.
- [29] 王君. 基于高分遥感的黄河三角洲土壤盐渍化变化特征分析[D]. 济南:济南大学, 2020.
- [30] 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.
- [31] 付腾飞. 滨海典型地区土壤盐渍化时空变异及监测系统研究应用[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
- [32] ZHENG Q, WANG H J, LI W T, et al. Factors influencing soil salinization in Manasi River Basin, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(3):214.
- [33] 沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3):769-776.
- [34] 袁玉芸, 瓦哈甫·哈力克, 关靖云, 等. 基于 GWR 模型的于田绿洲土壤表层盐分空间分异及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3273-3282.
- [35] 李艳菊, 丁建丽, 米热古力·艾尼瓦尔. 渭库绿洲土壤剖面盐分分布特征及驱动因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6):58-65.
- [36] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):139-144.
- [37] LIU Q, LI F D, ZHANG Q Y, et al. Impact of water diversion on the hydrogeochemical characterization of surface water and groundwater in the Yellow River Delta[J]. Applied Geochemistry, 2014, 48:83-92.
- [38] RAVSHANOV N, DALIEC S. Non-linear mathematical model to predict the changes in underground water level and salt concentration[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1441(1):012163.
- [39] JI K K, FAN J S, ZHAO X, et al. Analysis on dynamic change of vegetation coverage in coastal wetland of Yellow River Delta[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2020, 450(1):012108.

Influent Factors and Prediction Model of Soil Salinity at Different Depths in the Coastal Area of the Yellow River Delta

ZHAO Ming, CHANG Chunyan, WANG Zhuoran, ZHAO Gengxing

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University/National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Tai'an 271000, China)

Abstract: It is an important basis for the improvement and utilization of salinized soil to find out the influencing factors of soil salinity. Taking the coastal Kenli area of the Yellow River Delta as the study area, this paper selected four influencing factors of groundwater, vegetation, landform and distance from the sea, determined seven indicators of groundwater depth, groundwater mineralization, vegetation type, vegetation coverage, landform type, relative elevation and distance from the sea, analyzed the relationship between each indicator and soil salt content, and selected the main driving factors of soil salt through grey correlation analysis. Then the multiple linear regression prediction model of soil salt content in different depth soil layers was constructed. The results showed that groundwater depth was negatively correlated with the salinity of each soil layer as an exponential function, vegetation cover, relative elevation and distance from the sea were negatively correlated with the power function of the salt content of each soil layer, and groundwater salinity was positively correlated with the salinity of each soil layer as an exponential function, and the correlation between each index and salt content gradually weakens with the increase of soil depth. The ranking of the correlation between soil salinity and each influencing factor in each soil layer was groundwater salinity> vegetation coverage> groundwater burial depth> relative elevation> distance from the Bohai Sea. The main drivers of soil salinity were groundwater salinity and depth, and surface vegetation cover. The multiple linear regression models of soil salinity in 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm and 45-60 cm soil layers based on the three factors of groundwater mineralization, vegetation coverage and groundwater depth were the best salt prediction models, determination coefficient of model set (R^2) was 0.742, 0.777, 0.794 and 0.828 respectively, and the root mean square error (RMSE) was 2.079 5, 2.081 9, 1.868 3 and 1.623 6 respectively, validation of model set (R^2) was 0.712, 0.756, 0.813 and 0.883 respectively, and the root mean square error (RMSE) was 1.952 0, 1.879 7, 1.728 9 and 1.227 3 respectively.

Keywords: the Yellow River Delta; different soil layers; soil salinity; influencing factors; prediction model

协办单位

黑龙江省作物学会

黑龙江省农业科学院水稻研究所

黑龙江省农业科学院克山分院

黑龙江省农业科学院黑河分院

黑龙江省农业科学院绥化分院

黑龙江省农业科学院佳木斯分院

黑龙江省农业科学院牡丹江分院

内蒙古丰垦种业有限责任公司