

环渤海平原区土壤盐渍化反演与水盐耦合分析

宋颖¹, 高明秀¹, 徐愤欣², 赵景辉³

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

2. 山东鲁研农业良种有限公司, 济南 250100; 3. 莱州市农业农村局, 山东 莱州 261400)

摘要: 为明晰土壤盐渍化多维空间分布特征、水盐耦合关系, 以环渤海平原的山东部分为研究区, 通过野外实测和室内分析获取数据, 基于经典统计方法对土壤水盐特征进行描述性统计分析; 利用 GIS 软件分析土壤含盐量、含水量的二维空间分布, GMS 软件可视化分析土壤盐渍化三维空间分异特征; 构建土壤水盐耦合协调模型, 定量分析不同因素对水盐耦合协调度的影响程度。结果表明: (1) 研究区土壤含盐量中位数为 2.08 g/kg, 以中度盐渍土为主, 土壤含盐量整体呈自上而下逐渐增大趋势, 表层土壤含水量均值为 15.38%, 全区域较缺水; (2) 二维空间上, 土壤含水量 < 20% 的面积为 17 519.48 km², 共占 86.64%; 表层 (0—20 cm) 土壤含盐量以轻度盐渍土为主, 面积为 10 051.87 km², 占总面积 49.71%。土壤含水量、土壤含盐量均呈自南向北增加趋势; 三维空间上, 土体盐渍化分布类型以均质型、底聚型为主, 局部存在表聚、两端集聚类型, 土体盐渍化分布特征复杂; (3) 东营区以北区域水盐耦合度多 > 0.66, 以南区域 (除平度、莱州市外) 耦合度多为 0.40~0.66, 形成以东营区为界, 以北区域水盐相互作用强度整体大于以南区域的空间格局; (4) 南部以低度协调、中度协调为主, 北部则以较高协调、高度协调为主, 高程、平均温度、平均降雨量、NDVI 对水盐耦合协调度影响最强, 其相关系数分别为 0.26, 0.25, 0.25, 0.21。研究结果可为环渤海平原区域盐渍土资源合理开发利用提供理论依据。

关键词: 土壤盐渍化; 多维可视分析; 水盐耦合关系; 环渤海平原

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0315-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.040

Inversion of Soil Salinization and Water Salt Coupling Analysis in the Bohai Rim Plain Area

SONG Ying¹, GAO Mingxiu¹, XU Zexin², ZHAO Jinghui³

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. Shandong Luyan Agricultural Variety Co., Ltd., Jinan 250100; 3. Laizhou Agricultural and Rural Bureau, Laizhou, Shandong 261400)

Abstract: In order to clarify the multidimensional spatial distribution characteristics and the water-salt coupling relationship of soil salinity, the Shandong part of the Bohai Rim Plain was taken as the research area. Data were obtained through field measurements and indoor analyses, and descriptive statistical analysis of soil water-salt characteristics were carried out based on classical statistical methods. GIS software was used to analyze the two-dimensional spatial distribution of soil salinity and water content, and GMS software visualization was used to and analyze the three-dimensional spatial differentiation characteristics of soil salinity. A soil water-salt coupling coordination model was constructed to quantitatively analyze the degree of influence of different factors on water-salt coupling coordination. The results showed that: (1) The median soil salinity in the study area was 2.08 g/kg, with moderately saline soils dominating, and the overall soil salinity showed a gradual increase from top to bottom; the mean value of surface soil water content was 15.38%, and the whole region was relatively water-scarce. (2) In the two-dimensions, the area with soil water content less than 20% was 17 519.48 km², which accounted for a total of 86.64%; the soil salinity in the surface layer (0—20 cm) was dominated by mildly saline soils, with an area of 10 051.87 km², accounting for

收稿日期: 2023-05-23

资助项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2021MD018); 国家重点研发计划项目 (2021YFD190090101)

第一作者: 宋颖 (1998—), 男, 在读硕士生研究生, 主要从事土地利用与保护研究。E-mail: yings9821@163.com

通信作者: 高明秀 (1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地资源与信息技术、盐碱地开发利用研究。E-mail: mxgao@sda.edu.cn

49.71% of the total area. Soil water content and soil salinity both showed an increasing trend from south to north. (3) The water-salt coupling degree in the area north of Dongying District was mostly greater than 0.66, while the coupling degree in the area south (except Pingdu and Laizhou City) was mostly concentrated in the range of 0.40–0.66, forming a spatial pattern in which the intensity of water-salt interaction in the area north of Dongying District as a whole was greater than that in the area south. (4) The southern part of the study area was dominated by low coordination and medium coordination, while the northern part was dominated by higher coordination and high coordination. Elevation, average temperature, average rainfall and NDVI had the strongest influence on the coordination of water-salt coupling, with correlation coefficients of 0.26, 0.25, 0.25 and 0.21 respectively. The results of the study can provide a theoretical basis for the rational development and utilization of saline soil resources in the Bohai Sea Plain region.

Keywords: soil salinization; multidimensional visual analysis; soil water and salt coupling coordination; Bohai Rim Plain

土壤盐渍化已成为全球性的生态环境问题,对农业生产活动和资源可持续利用造成严重阻碍^[1]。中国盐渍土总面积约 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占全国可投入使用土地面积的 4.88%^[2], 主要分布于华北、东北平原, 西北内陆地区及滨海地区。盐渍土作为最主要的中低产土地类型之一, 加强治理和利用, 可扩增国家耕地资源, 保障粮食安全。

环渤海地区是中国重要的粮棉果蔬生产基地, 也是近年来中国盐渍化土壤资源开发利用的主战场之一^[3]。自 2013 年国家在该区域实施渤海粮仓科技示范工程项目以来, 已采取多种综合措施, 开发利用盐碱荒地, 改造提升中低产田, 发展粮食生产, 土地单产连创新高, 取得较好成效^[4]。然而, 该区域仍面临着淡水资源匮乏、土壤盐渍化严重等瓶颈。充分认识土壤盐渍化的空间分布特征和水盐耦合特征, 科学利用有限的淡水资源缓解土壤盐渍化, 对于维护耕地动态平衡、保障农业发展和生态环境安全具有重要意义。

关于土壤盐渍化二维空间分布特征的研究^[5-6]已趋于成熟, 王卓然等^[7]利用统计分析、GIS 空间插值等方法, 明晰无棣县土壤盐渍化以中度为主, 盐渍化程度自西南向东北、自地表向下呈逐渐加重趋势; 魏慧敏等^[8]研究发现, 银川平原土壤主要以非盐渍化、轻度盐渍化为主, 下层盐渍化程度轻于上层。近年来, 通过野外采样、电导率测定或遥感反演, 利用各种插值方法实现区域土壤盐渍化二维平面可视化, 在指导盐渍土壤分区改良中发挥重要作用。然而, 仅通过二维层面的分析, 难以充分掌握土体盐渍化的全貌, 限制改良措施的利用; 实现土壤盐渍化多维可视化, 特别是从三维视角立体观察分析土体盐渍化状况, 有助于土壤盐渍化治理从面状转向立体、从粗放转向精准, 为精准农业提供科学依据^[9-10]。当前, 对土体盐渍化三维空间分布特征的研究仍处于初步探索阶段, 已有的研

究^[11-12]多针对内陆的新疆或长三角等地的小尺度地块, 环渤海区域大尺度的研究仍十分缺乏。

土壤水盐特征是反映土壤盐渍化程度、状态的关键, 受多种因素综合作用^[13]。掌握土壤水盐互作关系对于有效改良盐渍土是必要的。Nachshon^[14]分析世界盐渍化灾害突出国家的农田土壤盐渍化和相关水文过程表明, 水文过程直接影响着农田土壤中盐分积累; 马贵仁等^[15]探讨河套灌区地下水埋深动态对土壤含盐量的影响发现, 随浅层地下水埋深的增大土壤盐分逐渐减少。以上研究多侧重于对内陆干旱、半干旱区域土壤盐渍化过程中的水盐关系。滨海平原区特殊的地理条件, 导致土壤盐渍化过程中水盐关系具有独特性、相互作用更为复杂, 对农业生产的影响也有别于内陆地区。现有对滨海地区土壤水盐关系的探讨^[16], 尚未重视对二者耦合影响因素的深入研究。摸清土壤水盐耦合协调度及其影响因素, 有助于实现淡水资源匮乏的滨海平原盐渍土节水型改良。

拟以环渤海平原的山东部分为研究区域, 通过建立野外实测土壤电导率与含盐量的关系模型, 解译不同土层土壤含盐量, 在统计分析土壤水盐特征基础上, 利用 GIS、GMS 软件, 基于反距离权重法实现土体盐渍化多维可视化, 并分析其空间分异特征; 构建土壤水盐耦合协调度模型, 定量分析不同因素对水盐耦合协调度的影响程度, 旨在为环渤海平原区因地制宜采取针对性措施, 合理规划、有效治理利用盐渍土提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于环渤海平原的山东部分 ($117^{\circ}26'—120^{\circ}19'E$, $36^{\circ}26'—38^{\circ}19'N$), 主要包括庆云县、无棣县、沾化区、河口区、利津县、垦利区、东营区、广饶县、

寿光市、寒亭区、昌邑市全境和平度市、莱州市的部分区域(图1)。区域南高北低,地貌类型包括河滩高地(各期河道河床、边滩、天然堤和决口扇)、泛滥平原和洼地。研究区地处暖温带,冬寒夏热,年平均气温9~20℃,年均降水量530~630 mm,年均潜在蒸散量1 500 mm。降水时空分布不均,春季降水少、蒸发强烈,地表易积盐,夏季雨水集中易形成涝灾。

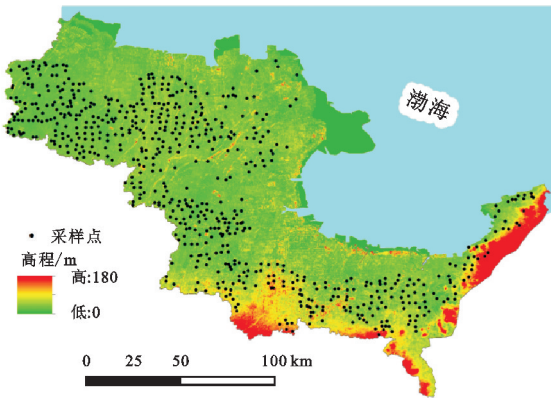


图1 研究区采样点分布

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 野外调查与采样 研究区土壤盐分呈“春积盐、夏脱盐、秋又积、冬稳定”的季节性动态变化,3—5月正值春季,气温快速回升,降水稀少,大风频繁,蒸发强烈,表土处于积盐阶段,是研究和调控土壤盐渍化的关键时段。因此,实地调查在2019年3月中旬至5月上旬进行。样点布设采用网格法,在室内分析遥感影像的基础上,以5 km×5 km网格覆盖研究区内土地,每个网格中心布设1个采样点,野外采样时,根据实地情况进行合理调整。使用奥维互动地图软件获取样点坐标,并记录土地利用现状、类型、覆盖度及植物长势等。在每个样点,使用EC110电导率仪分别测定2.5,7.5,15.0,22.5,30.0,37.5,45.0,52.5 cm深度土层电导率;利用土钻钻取2份土壤样品,1份密封用于烘干法测定土壤水分,另1份用于化验土壤属性^[17],共测得电导率数据666组,采集土壤样品537份。

1.2.2 土壤含盐量解译模型 将带回实验室的土壤样品在室温下自然风干后,磨碎、过筛。采用1:5土水比浸提,烘干法测定土壤含盐量,建立野外实测土壤电导率(S_t)与土壤含盐量(EC_0)间的关系模型为:

$$S_t = 0.0021EC_0 + 0.7507 \quad n = 376 \quad R^2 = 0.873 \quad (1)$$

式中: S_t 为野外实测土壤电导率(uS/m); EC_0 为土壤含盐量(g/kg)。利用该模型,解译获得666组土壤含盐量数据。

1.2.3 土壤水盐耦合程度影响因素数据来源 高程数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn);坡度数据依据高程数据,借助Arcgis10.7软件反演获

取;2019年3—5月平均气温、平均降雨量数据来源于国家青藏高原科学数据中心;植被覆盖指数(NDVI)数据通过Landsat8 OLI遥感影像反演获取;水源数据来源于全国地理信息资源目录服务系统,借助ArcGIS软件构建缓冲区获取距水源最短距离;有机质、pH数据均通过实验室化验分析获取。为便于后续分析,将坡度、气温、降雨量、距水源最短距离、有机质分别标注为 S_{slo} 、 S_{tem} 、 S_{pre} 、 S_{dis} 、 S_{om} 。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤盐渍化特征统计分析 借助SPSS 23.0软件,采用经典统计学方法分析土壤含盐量、含水量描述性统计特征(包括最大值、最小值、平均数、中位数、方差、标准差、变异系数)。其中,变异系数可划分为弱($0 < CV < 0.1$)、中($0.1 \leq CV < 1.0$)、强($CV \geq 1.0$)3个变异程度等级。将土壤盐渍化程度^[18]分为非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化和盐土5个级别,含盐量(g/kg)区间分别为(0,1),[1,2),[2,4),[4,6),[6,+∞)。

1.3.2 土壤盐渍化空间特征多维可视分析

(1)土壤盐渍化二维可视分析。基于样点离散数据,采用GIS软件二维反距离权重法(2D-IDW)插值功能得到土壤水盐二维空间面状数据,分析土壤水盐的二维空间分异特征。2D-IDW是一种全局加权平均插值方法,该方法的核心思想为研究区范围内的每个观测点对于插值点都有局部影响,任意观测点的值对插值点值的影响随距离的增加而不断减弱。

(2)土体盐渍化三维可视分析。基于GMS软件,采用剖面分布函数法,构建土壤盐分三维数据离散数据模型、三维网格数据模型和空间三维结构图,采用三维反距离权重法(3D-IDW),对土体盐分三维空间分布估值与可视化模拟,以立体视角分析土体盐渍化的三维空间特征。3D-IDW是2D-IDW在三维空间中的应用与拓展,其基本原理是2点之间距离越近,性质越相似,以待测样点与已知样点之间的距离作为权重进行加权平均,距离待测样点越远的样点所赋予的权重越小,其公式为^[19]:

$$V(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

$$h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (3)$$

$$w_i = \left[\frac{R-h_i}{Rh_i} \right]^2 / \sum_{j=1}^n \left[\frac{R-h_j}{Rh_j} \right]^2 \quad (4)$$

式中: $V(x, y, z)$ 为待测样点值; $v_i(x_i, y_i, z_i)$ 为已知样点值; h 为待测样点到已知样点距离; w_i 为权重; R 为参与计算的 n 个已知样点到待测样点距离的最大值。

1.3.3 水盐耦合度分析模型

(1)土壤水盐耦合度。耦合度一般用来度量2个

或 2 个以上的系统或要素间的协同程度,通常作为评价耦合状态的重要指标^[20]。土壤表层水分、盐分受内外界因素综合作用,其空间分布往往具有高度分异性,导致局部区域土壤水盐相互作用程度不同,而土壤水盐系统常遵循“盐随水来、水走盐留”的运移规律,蒸发强烈季节尤其显著,因此,引入耦合度模型,以揭示土壤含盐量与土壤含水量间彼此相互作用又相互影响的内在耦合机制^[16],具体计算公式为:

$$C = \left[\frac{S_i \times W_0}{[(S_i + W_0)/2]^2} \right] k \quad (5)$$

式中: C 为土壤含盐量与土壤含水量的耦合度, $0 \leq C \leq 1$, C 值越大,表明土壤水盐系统间相互影响的程度越大; S_i 为土壤含盐量; W_0 为土壤含水量; K 为调节系数($K=0.5$)。

(2) 土壤水盐耦合协调度。为进一步表征区域土壤含盐量、土壤含水量之间的大小特征,引入耦合协调度(D)以衡量两者间的耦合协调程度。计算公式为^[21]:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

$$T = \alpha S_i + \beta W_0 \quad (7)$$

式中: D 为土壤含盐量与土壤含水量的耦合协调度, D 值越大,即两系统间协调度越高; T 为综合协调指数,认为土壤含水量多于含盐量时,更有助于系统间的协调,因此取 $\alpha=0.4$, $\beta=0.6$ 。

根据水盐相关区间,对比水盐耦合协调度可将研究区划分为 4 个区域,在水少盐少的情况下(低度协

调),土壤水盐耦合协调度集中分布在 $(0, 0.29]$;在水多盐少的情况下(中度协调),土壤水盐耦合协调度集中分布在 $[0.29, 0.35]$;在水多盐多的情况下(较高协调),土壤水盐耦合协调度集中分布在 $[0.35, 0.58]$;随水盐含量再次升高(高度协调),集中分布在 $[0.58, 1]$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤水盐描述性统计特征分析

由表层(0—20 cm)、不同深层土壤含盐量和含水量统计结果(表 1)可知,表层土壤含盐量为 0.81~40.27 g/kg,平均值为 3.27 g/kg,大于中位数(2.08 g/kg),数据呈右偏态分布,研究区表层土壤整体属于中度盐渍化;变异系数为 1.32,说明水平方向上不同区域土壤含盐量差异大,呈强变异性。土壤含水量的范围在 0.48%~44.95%,平均值为 15.38%,中位数为 15.67%,平均值与中位数间无明显差异;变异系数为 0.37,呈中等程度变异。

不同深度(2.5, 7.5, 15, 22.5, 30, 37.5, 45, 52.5 cm)土层含盐量均值分别为 3.70, 3.03, 3.07, 3.21, 3.43, 3.66, 3.74, 3.84 g/kg,中位数分别为 1.77, 2.07, 2.30, 2.50, 2.65, 2.80, 2.94, 3.00 g/kg,总体呈由上向下增加趋势,对应土层平均值均大于中位数,即每层次土壤含盐量均呈右偏态,整体表现为中度盐渍化;变异系数为 0.77~1.88,上面 3 层(2.5, 7.5, 15 cm)处呈强变异,15 cm 以下各土层均呈中等程度变异,从地表向下变异系数逐渐减小。

表 1 表层土壤水盐统计分析

土壤属性	土层深度/cm	样本数	最小值	最大值	平均值	中位数	方差	标准差	变异系数
土壤含水量/%	0—20	666	0.48	44.95	15.38	15.67	31.67	5.63	0.37
	0—20	666	0.81	40.27	3.27	2.08	18.61	4.31	1.32
土壤含盐量/ (g · kg ⁻¹)	2.5	666	0.77	55.98	3.70	1.77	48.34	6.95	1.88
	7.5	666	0.76	40.57	3.03	2.07	14.61	3.82	1.26
	15.0	666	0.84	33.09	3.07	2.30	9.50	3.08	1.00
	22.5	666	0.77	29.29	3.21	2.50	7.25	2.69	0.84
	30.0	666	0.78	26.48	3.43	2.65	7.89	2.81	0.82
	37.5	666	0.76	61.65	3.66	2.80	13.05	3.61	0.99
	45.0	666	0.80	30.55	3.74	2.94	9.21	3.03	0.81
	52.5	666	0.77	24.75	3.84	3.00	8.75	2.96	0.77

2.2 土壤含水量空间分布特征

由图 2 可知,表层(0—20 cm)土壤含水量空间分布与占比情况。环渤海平原山东区域土壤含水量整体偏低,空间分布存在明显的差异。土壤含水量>30%的区域呈点状散布于河口区、利津县,所占面积不足 1%;含水量为 20%~30%的区域集中分布于河口区、利津县、垦利区,所占面积为 2 668.08 km²,占比 13.19%;含水量为 15%~20%的区域分布广泛,但多集中分布于广饶县以北的县区,占比 35.11%;含水量<15%的区域则主要位于寿光、昌邑、莱州三市和寒亭区,共占 51.53%。

综合而言,研究区土壤含水量空间分布呈现出以广饶县为界,北部整体高于南部的格局。

2.3 土壤盐渍化空间分布特征

2.3.1 二维空间分布特征 环渤海平原山东土壤表层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)、底层(40—60 cm)含盐量二维空间分布见图 3。在二维水平空间上,研究区各层土壤含盐量均整体表现为自南向北逐渐升高;3 层对比,盐渍化程度重的面积从表层至中层、底层显著增加,表明随土层深度增加,土壤盐渍化程度逐渐加重。在表层,盐土与重度盐渍土区域紧邻,主

要分布于研究区北部区县的滨海区域;中度盐渍土主要分布于研究区北部区县的非滨海部分及广饶县、寒亭区;轻度盐渍土主要分布于研究区南部的寿光市、昌邑市和莱州市。中层、底层与表层土壤含盐量在空

间分布上的差异主要集中于研究区南部,大部分表层轻度盐渍化区域在中、底层加重为中度盐渍化,北部区域的分布特征总体一致,但局部区域存在中度盐渍化加重为重度盐渍化的现象。

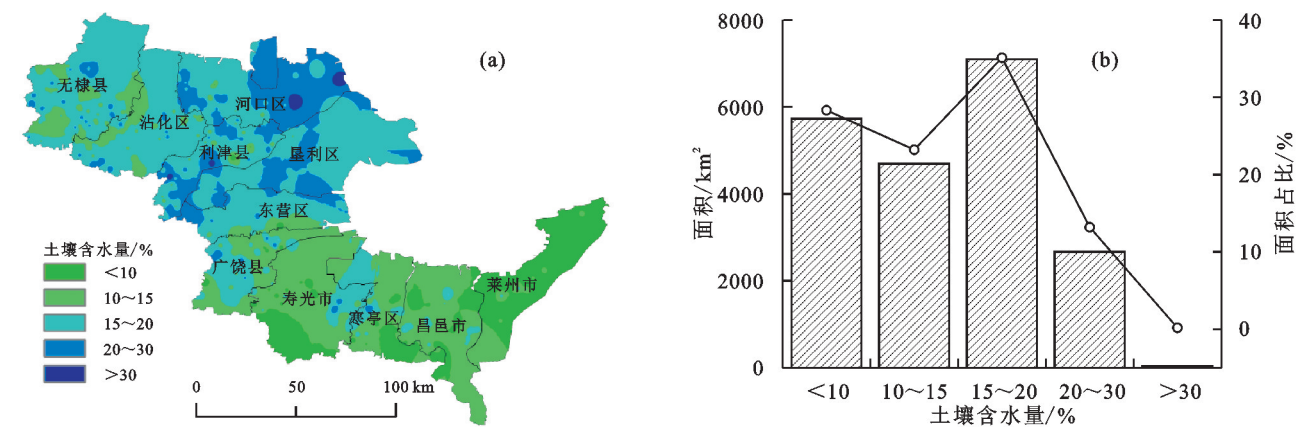


图 2 土壤含水量空间分布及面积占比

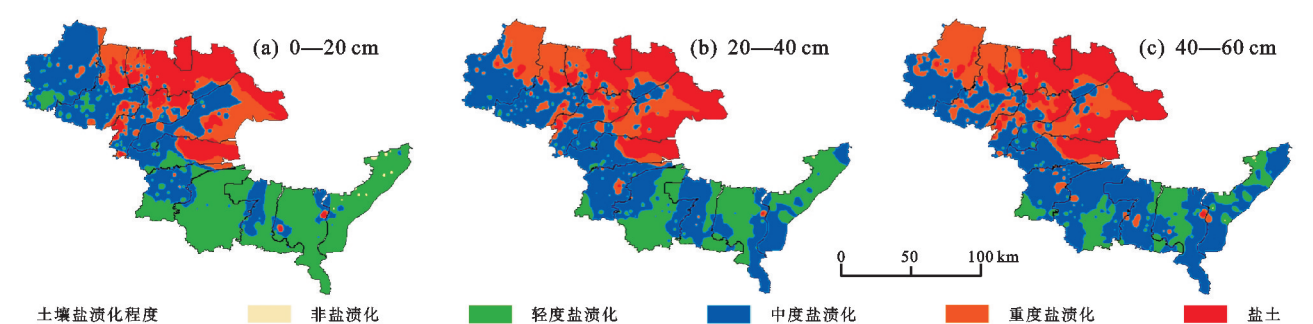


图 3 不同深度土壤含盐量二维空间分布

不同深度土层含盐量空间分布及面积占比见表 2。非盐渍化土在不同深度层次所占比重均不足 0.1%。从表层至底层,轻度盐渍化面积由 10 051.87 km² 减少到 5 295.14 km²,所占比重由 49.71%减少到 26.81%;中度盐渍化面积由 5 338.17 km² 增加到 9 088.10 km²,所占比

重由 26.40%增加到 44.94%;重度盐渍化面积由 1 660.48 km² 增加至 2 177.87 km²,盐土面积由 3 154.91 km² 增加至 3 656.74 km²。综合而言,随土层深度增加,轻度盐渍土占比逐渐减少,中、重度盐渍化、盐土占比逐渐增加,土壤盐渍化程度呈由上向下逐渐加重的趋势。

表 2 不同深度土壤含盐量面积及占比

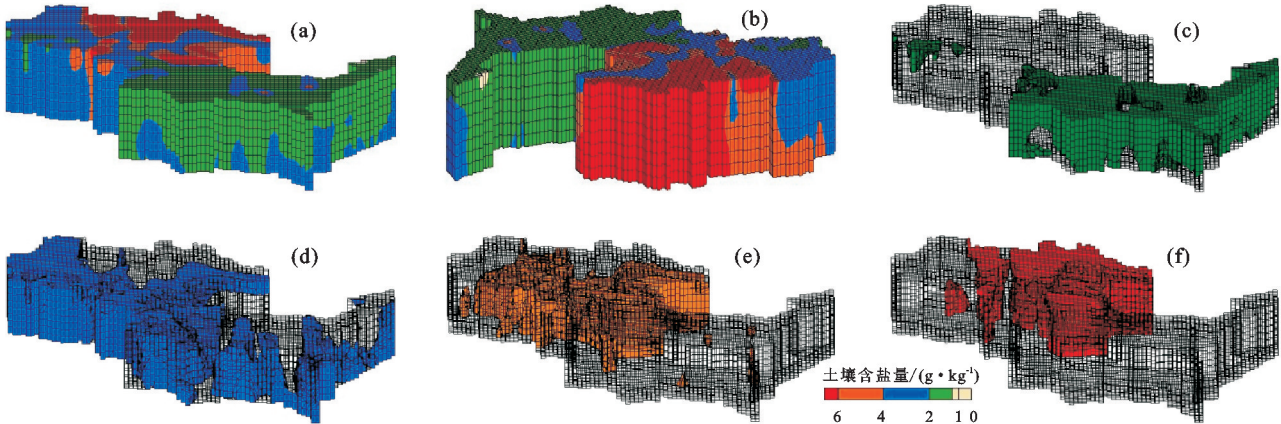
盐渍化 程度	土壤含盐量/ (g · kg ⁻¹)	面积/km ²			占比/%		
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
非盐渍化	<1	16.66	1.59	4.10	0.08	0.01	0.02
轻度盐渍化	1~2	10051.87	7337.29	5295.14	49.71	36.28	26.18
中度盐渍化	2~4	5338.17	7469.51	9088.10	26.40	36.94	44.94
重度盐渍化	4~6	1660.48	1869.96	2177.78	8.21	9.25	10.77
盐土	>6	3154.91	3543.74	3656.97	15.60	17.52	18.08

2.3.2 三维空间分布特征 研究区土体盐分三维空间分布状况见图 4。由图 4a、图 4b 可知,研究区耕地土体盐分三维分布特征较为复杂,以均质型(土体从上到下盐渍化程度相同)、底聚型(土体底部盐渍化程度大于上部)为主,局部存在表聚型(土体上部盐渍化程度大于中部和底部)、两端集聚型分布(土体上部和底部盐渍化程度大于中部)。

具体而言(图 4c、图 4d),研究区南部的广饶县、寿光市、寒亭区、昌邑市 4 个市县,以及平度市与莱州

市的部分区域土体盐渍化类型以底聚型为主,土体底部主要呈中度盐渍化,上部为轻度盐渍化,与其地势较高、地下水矿化度相对较低有关。高地势致使底层盐分难以转移至地表,而上层盐分随灌溉、降雨下移,在底部形成积聚。研究区西北部的无棣县、沾化区南部区域以均质型为主,局部为底聚型。研究区中部的东营区、北部的河口区、垦利区、利津县和沾化区北部区域主要以均质型为主(图 4e、图 4f),局部存在表聚型、底聚型。该区域长期受海水浸渍,地下水矿化度

多大于 30 g/L,地下水埋深 1~3 m,耕地土壤以重度盐渍土、盐土为主,盐渍化危害最严重。现场调查中发现,此区域种植的小麦长势差,麦田中斑块状缺苗现象较普遍。



注:(a)、(b)分别为三维空间分布正视图、三维空间分布后视图(由 a 逆时针旋转 180°),(c)、(d)、(e)、(f)分别为轻度、中度、重度和盐土的三维空间分布。

图 4 环渤海山东区耕地土壤盐分三维空间分布

2.4 土壤水盐耦合关系分析

利用公式(5)~公式(7)计算得到土壤水盐耦合度、耦合协调度,并运用 ArcGIS 软件进行空间呈现(图 5),不同区县土壤水盐耦合协调度统计见表 3。由图 5a 可知,环渤海平原山东区域土壤水盐耦合度呈显著的空间差异,无棣县、沾化区、东营区、寿光市、昌邑市土壤水盐耦合度多为 0.40~0.67,水盐相互作用较弱;垦利区、寒亭区和莱州市水盐耦合度多为 0.67~0.78,水盐相互作用程度处于中等水平;河口区、利津县水盐相互作用较强。综合而言,研究区南部水盐相互作用强度整体低于北部。

由表 3 可知,东营区以北的区域土壤水盐耦合协

调度均值均在 0.4 以上,其中水盐耦合协调度最大的为河口区,其次为利津县;水盐耦合协调度最小的为沾化区。东营区以南的区域土壤水盐耦合协调度均值均小于 0.4,其中水盐耦合协调度最大的为广饶县,最小的为莱州市。

由图 5b 可知,低度协调区集中分布在研究区南部;中度协调区域所占比重较少,呈块状分布于研究区北部的无棣县、沾化区,呈条带状分布于研究区南部的东营区、广饶县、寿光市、昌邑市和平度市;较高协调区、高度协调区集中分布于广饶县以北的区域。整体而言,研究区形成以东营区为界,以北区域的水盐耦合协调度整体大于以南区域的空间分异特征。

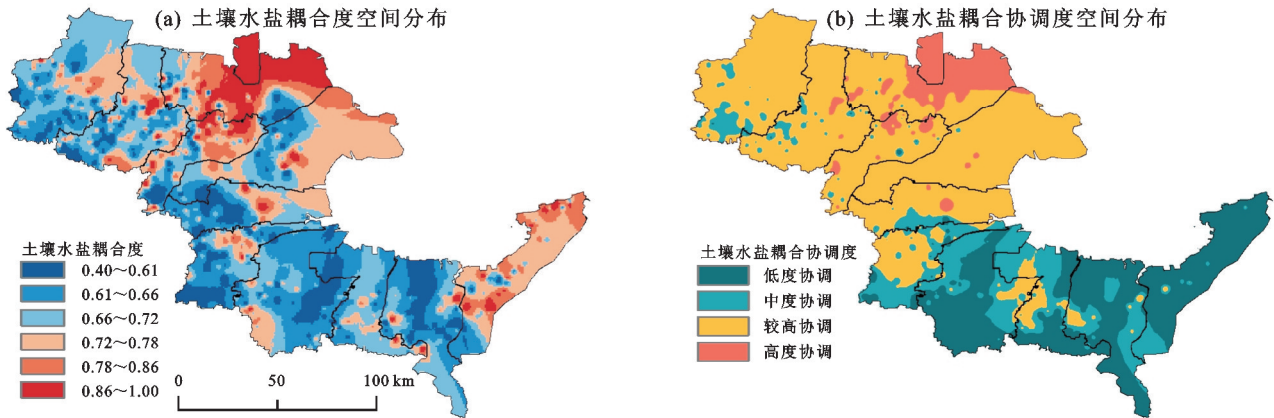


图 5 土壤水盐耦合空间分布

表 3 不同区域土壤水盐耦合协调度统计

区域	无棣	沾化	河口	利津	垦利	东营	广饶	寿光	寒亭	昌邑	平度	莱州
最小值	0.25	0.26	0.23	0.20	0.30	0.18	0.17	0.14	0.06	0.16	0.06	0
最大值	0.50	0.85	1.00	0.87	0.68	0.87	0.54	0.43	0.56	0.60	0.29	0.44
平均值	0.38	0.40	0.55	0.48	0.45	0.40	0.35	0.29	0.29	0.29	0.19	0.19

2.5 土壤水盐耦合关系的影响因素分析

2.5.1 土壤水盐耦合协调度的影响因素分析 采用箱线图法,分别分析地形、气候、植被、水源及土壤因

素对水盐耦合协调度的影响。由图 6a 可知,高程不同对水盐耦合协调度的影响不同,高程为<4,4~6,6~8,8~10,10~15,>15 m 时,土壤水盐耦合协调

度均值分别为 0.38, 0.39, 0.39, 0.40, 0.35, 0.27。高程 >15 m 的土壤水盐耦合协调度明显低于其他高程梯度, 在 0~15 m 范围内, 水盐耦合协调度呈现出随高程升高先波动上升、在 8~10 m 处达到峰值后呈下降趋势。由图 6b 可知, 坡度不同对水盐耦合协调度的影响不同, 坡度为 <0.5 , $0.5\sim2$, $2\sim5$, $5\sim15$, $15\sim35^\circ$ 时, 水盐耦合协调度均值分别为 0.40, 0.38, 0.35, 0.34, 0.32, 整体表现为水盐耦合协调度随坡度增加而逐渐降低趋势。

由图 6c、图 6d 可知, 温度、降雨量不同对水盐耦合协调度的影响也不同, 温度的影响总体表现为土壤水盐耦合协调度随温度升高呈逐渐增大趋势, 在 $15.0\sim15.4$ $^\circ\text{C}$ 内达到峰值; 降雨量的影响则表现为水盐耦合协调度随降雨量增加呈直线降低趋势。

由图 6e、图 6f 可知, 当土壤有机质为 <6 , $6\sim10$, $10\sim20$, >20 g/kg 时, 土壤水盐耦合协调度分别为 0.45, 0.44, 0.36, 0.33, 形成以 10 g/kg 为临界值, 有机质低值区水盐耦合协调度明显高于有机质高值区的特征。当土壤 pH 为 <6.8 , $6.8\sim7.4$, $7.4\sim8.1$, $8.1\sim8.3$, >8.3 时, 土壤水盐耦合协调度分别为 0.25, 0.27, 0.41, 0.38, 0.37, 0.39, 整体表现为先增再减又增的趋势。

从图 6g、图 6h 可见, 不同 NDVI 与距水源最短距离对土壤水盐耦合协调度的影响, 当 NDVI 小于 0.27 时, 土壤水盐耦合协调度较高, 2 个区间协调度均值分别为 0.44, 0.45; 当 NDVI >0.27 时, 土壤水盐耦合协调度值为 0.34~0.36。当距水源距离在 2 km 以内, 土壤水盐耦合协调度均值为 0.37~0.39; 距水源距离 >2 km 时, 协调度均值为 0.32~0.38, 水盐耦合协调度呈逐渐降低趋势。

2.5.2 各因素与土壤水盐耦合协调度相关性分析

采用斯皮尔曼法分析各影响因素与水盐耦合协调度的相关性(图 7)。高程、平均降雨量、NDVI、有机质、坡度与土壤水盐耦合协调度间呈极显著负相关, 相关系数分别为 0.26, 0.25, 0.25, 0.21, 0.15, 0.10; 距水源最短距离与土壤水盐耦合协调度呈显著负相关, 相关系数为 0.10; 平均温度、pH 与其呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.26, 0.20。各影响因素与土壤水盐耦合协调度间的相关性(取绝对值后)从大到小排序依次为 $\text{DEM}=\text{S}_{\text{tem}}>\text{S}_{\text{pre}}=\text{NDVI}>\text{S}_{\text{om}}>\text{pH}>\text{S}_{\text{slo}}>\text{S}_{\text{dis}}$ 。

3 讨论

3.1 土壤盐渍化多维可视化分析

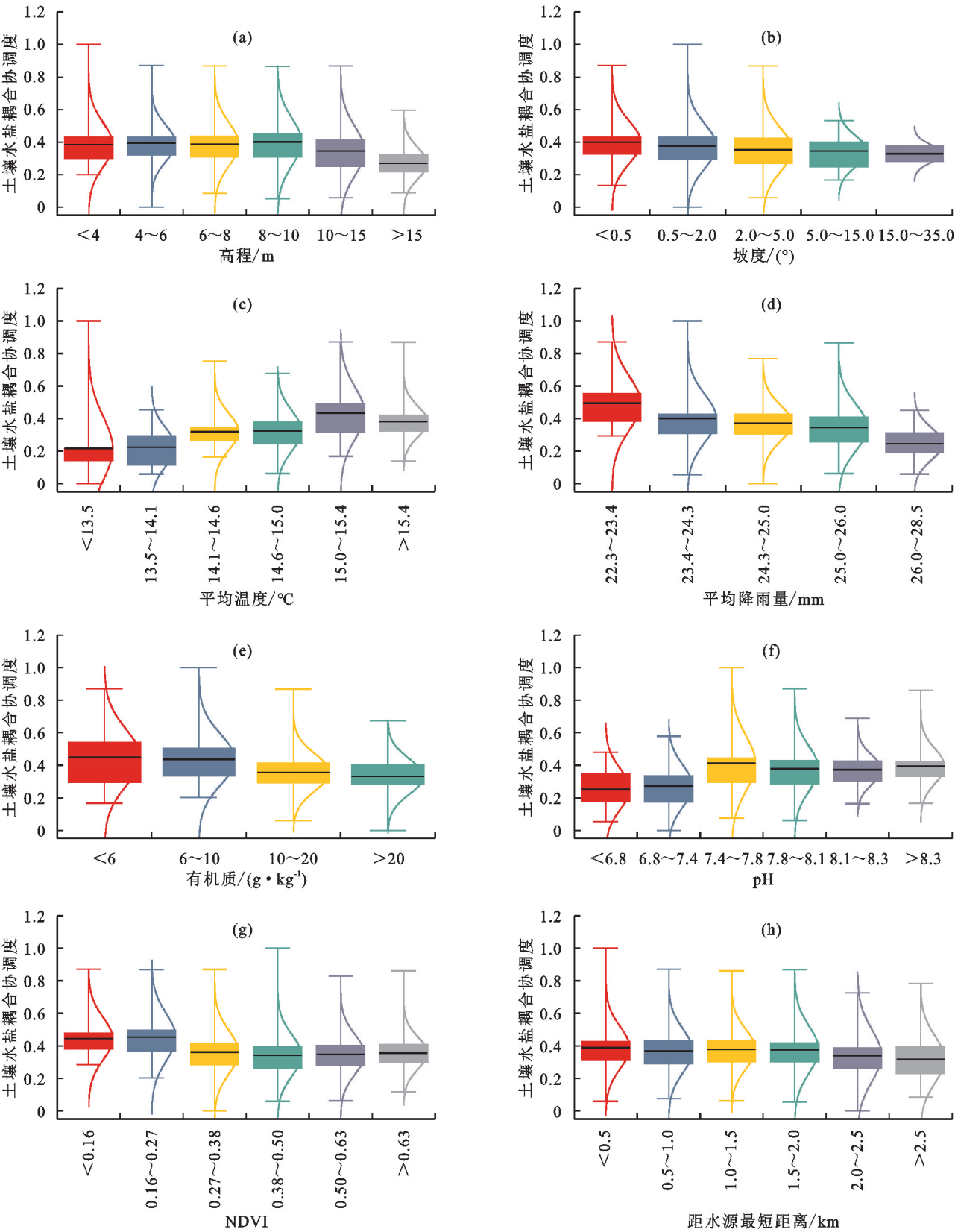
土壤作为三维实体, 仅从二维平面分析远不能满足充分认识盐渍化特征和规律、精准防治土壤盐渍化的目的, 也是以往滨海平原土壤盐渍化研究的局

限^[22-23]。环渤海平原淡水资源匮乏, 但农业生产中通常以漫灌方式进行式灌溉和淋盐, 造成淡水资源浪费。借助 GIS、GMS 软件等现代化信息技术, 实现土体盐渍化的可视化分析, 能全方位认识土体盐渍化的多维空间特征, 进一步明晰土壤盐渍化发生与变异机制, 并通过栅格计算精确获取土体灌溉和调盐需水量, 可为实现精准灌溉、发展精准农业奠定基础。本研究探明环渤海平原山东区域春季土体盐分的多维空间特征, 在二维水平方向上, 北部低海拔临海区县的盐渍化程度整体高于南部, 即整体分布规律呈现为距海越近、海拔越低, 土体含盐量越高, 与黄静等^[24]对垦利区的研究结果一致; 在二维垂直方向上, 由于成土母质及长期受海水浸渍等因素的影响, 土壤盐渍化程度整体表现为随土层深度增加逐渐加重的趋势, 与王卓然等^[25]研究结果一致。本研究初步明确研究区土体三维空间分布以均质型、底聚型为主, 局部存在表聚与两端集聚的特征, 弥补环渤海平原区大尺度范围内关于盐渍化三维空间分布研究的空白。在今后改良中应重视研究区西部、北部以及中部的均质型盐渍土, 以提高环渤海区域盐渍土改良效果, 提升该区域粮食生产上限。

3.2 土壤水盐耦合关系分析

研究区南部的水盐相互作用强度整体低于北部, 原因可能是在春季强烈蒸发条件下, 北部土壤含盐量较高, 地下水埋深浅, 北部土壤表层水分在毛管作用下得以补充, 形成“盐随水来、盐高水多”的同向耦合; 而南部土壤含盐量较低, 地下水埋深较深, 表层土壤水分蒸发后又无灌溉降雨而缺乏必要补充, 形成“水去盐留、盐低水少”的逆向耦合, 从而导致北部的水盐相互作用强度大于南部。

研究区低度协调主要特征为盐少、水少, 对于该部分区域应注意补充淡水资源, 防止土壤缺水而对作物生长产生影响; 中度协调区域主要特征为盐少、水适中, 对于该部分区域可保持正常管理; 较高协调区域主要特征为盐多、水适中, 盐分多为中度、重度盐渍土, 在研究区分布范围最广, 对于该部分区域应以防止盐渍化程度加重为主, 考虑多措并举, 如改善土壤结构、隔层手段控制(深耕等措施切断土壤毛细管), 不同覆盖措施抑制或减轻表层土壤水分蒸发等, 防止返盐; 高度协调区域为土壤盐、水均极多的区域, 集中于研究区北部的河口区、利津县, 对于该部分区域应在防止盐渍灾害的基础上, 采取工程措施或生态排水手段, 达到排水和降低地下水位的效应, 同时防治涝渍灾害与盐渍灾害。

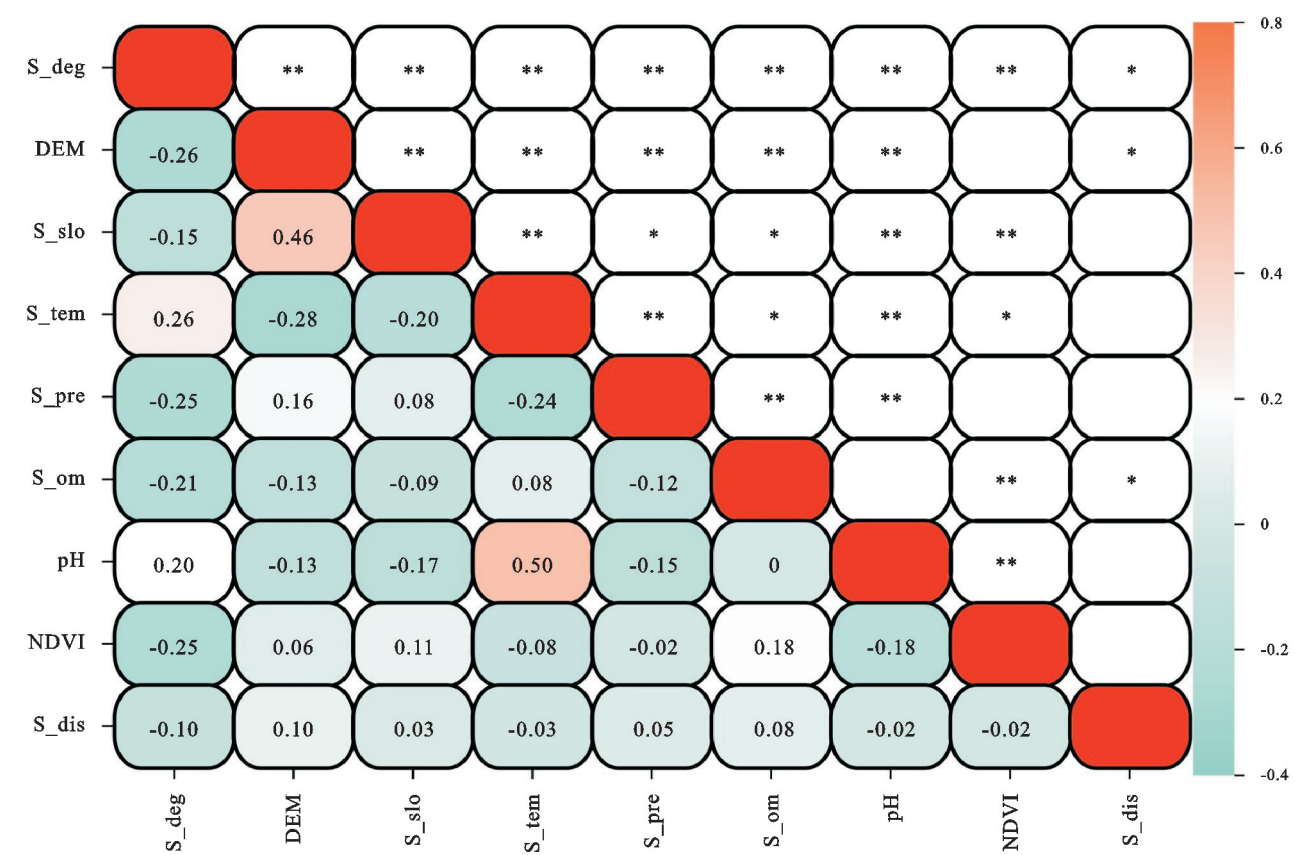


注:箱线图图中的黑色线表示均值,两端横线分别表示最小值、最大值,曲线表示数据分布特征。

图 6 不同因素对水盐耦合协调度的影响

在今后盐渍土改良工作中,如何结合土壤水盐耦合协调程度信息及盐渍化三维空间分布特征,实现分区域精准调水、精确调盐,是下一步实现精细化农业的关键,也是环渤海盐渍土区域实现盐渍土资源高效

利用、盐碱农业高质量发展须克服的难关。此外,初步探明环渤海平原区表层土壤水盐耦合协调关系,而在不同深层土壤间水盐关系更为复杂,应是滨海平原区下一步研究工作的重点。



注:S_deg、DEM、S_slo、S_tem、S_pre、S_om、pH、NDVI、S_dis 分别为土壤水盐耦合协调度、高程、坡度、平均温度、平均降雨量、有机质、pH、植被覆盖程度、距水源最短距离; * 表示 $p<0.05$; * * 表示 $p<0.01$ 。

图 7 不同因素与水盐耦合协调度相关性

4 结 论

(1)数理统计分析结果表明,研究区表层土壤含盐量为 0.81~40.27 g/kg,整体表现为中度盐渍化,呈强变异;表层土壤含水量为 0.48%~44.95%,均值为 15.38%,呈中等变异。除 2.5 cm 外,土壤含盐量均值从上至下表现为逐渐增加趋势。

(2)研究区土壤含水量<20%的区域面积为 17 519.48 km²,共占研究区总面积 86.64%,整体表现为缺水,含水量空间分布上显示为北高南低的格局。

(3)土壤含盐量在二维水平方向上呈现自南向北逐渐增加趋势,研究区南部由于地势较高,一定程度上抵消海水侵蚀造成的盐渍化程度高的影响;垂直方向上土壤含盐量整体表现为随土层深度增加,盐渍化程度逐渐加重,变异系数逐渐减小的变化趋势。三维空间上,盐分在土体中的分布类型以均质型、底聚型为主,局部存在表聚、两端集聚。

(4)研究区南部水盐相互作用强度整体低于北部;南部以低度协调、中度协调为主,北部则以较高协调与高度协调为主。除距水源最短距离外,不同影响因素与水盐耦合协调度间均呈极显著相关,高程、平均温度、平均降雨量、NDVI 与其相关性最强。

参考文献:

[1] Wu D, Jia K L, Zhang X D, et al. Remote sensing inversion

for simulation of soil salinization based on hyperspectral data and ground analysis in Yinchuan, China[J].Natural Resources Research,2021,30(6):4641-4656.

[2] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.

[3] 高明秀,薛敏,王洪莹.环渤海盐碱地可持续利用路径抉择与政策建议[J].中国人口·资源与环境,2016,26(增刊 2):228-231.

[4] 李振声,欧阳竹,刘小京,等.建设“渤海粮仓”的科学依据:需求、潜力和途径[J].中国科学院院刊,2011,26(4):371-374.

[5] 孙亚楠,李仙岳,史海滨,等.基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J].农业机械学报,2022,53(12):366-379.

[6] 李俊翰,高明秀.黄河三角洲滨海土壤盐渍化时空演化特征[J].土壤通报,2018,49(6):1458-1465.

[7] 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.

[8] 魏慧敏,贾科利,张旭,等.基于机器学习和多光谱遥感的银川平原土壤盐分预测[J].干旱区地理,2023,46(1):103-114.

[9] 冯春晖,刘新路,纪文君,等.基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究[J].土壤学报,2022,59(4):999-1011.

- [10] Song Y, Gao M X, Wang Z R, et al. Spatio-temporal variability characteristics of coastal soil salinization and its driving factors detection[J]. *Water*, 2022, 14(20): e3326.
- [11] 吴亚坤, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于电磁感应研究新疆土壤盐分三维空间变异对季节的响应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 173-178.
- [12] 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 359-363.
- [13] Chamaki S, 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): e35.
- [14] Nachshon U. Cropland soil salinization and associated hydrology: Trends, processes and examples [J]. *Water*, 2018, 10(8): e1030.
- [15] 马贵仁, 屈忠义, 王丽萍, 等. 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.
- [16] 张术伟, 王卓然, 常春艳, 等. 黄三角濒海区土壤水盐时空分异特征及耦合关系分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 299-308, 315.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 云安萍. 西北绿洲典型盐渍土区土壤盐分的空间分布特征及淋盐需水量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [20] 刘崇刚, 孙伟, 张落成. 长江三角洲碳排放与植被覆盖耦合协调时空格局及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2023, 43(1): 142-151.
- [21] 邝嫦娥, 李文意, 黄小丝. 长江中游城市群碳排放强度与经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(8): 30-40.
- [22] Thiam S, Villamor G B, Kyei-Baffour N, et al. Soil salinity assessment and coping strategies in the coastal agricultural landscape in Djilor district, Senegal[J]. *Land Use Policy*, 2019, 88: e104191.
- [23] 许婕, 刘加珍, 张天举, 等. 黄河口湿地柽柳灌丛土壤盐渍化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7118-7127.
- [24] 黄静, 赵庚星, 奚雪, 等. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取: 以垦利区为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(3): 594-601.
- [25] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 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.

(上接第 314 页)

- [10] 余江敏, 李伏生, 农梦玲. 根区局部灌溉和有机无机氮比例对种植玉米土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 334-340.
- [11] 贺伟. 不同灌溉方式对燕麦光合及土壤生物特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [12] 窦超银, 康跃虎, 万书勤, 等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 44-51.
- [13] 廖文超, 毕华兴, 赵云杰, 等. 晋西苹果+大豆间作土壤水分分布及其对大豆生长的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 24-28.
- [14] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 567-575.
- [15] 李超楠, 王若水, 周宣, 等. 滴灌水肥调控对苹果-大豆间作系统光合特性和水分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 299-310.
- [16] 张江红. 酚类物质对苹果的化感作用及重茬障碍影响机理的研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 李亮亮, 李天来, 张恩平, 等. 四种酚酸物质在土壤中降解的研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1460-1465.
- [20] Zhang Z Y, Pan L P, Li H H. Isolation, identification and characterization of soil microbes which degrade phenolic allelochemicals[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 108(5): 1839-1849.
- [21] 魏媛, 张金池, 喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(5): 71-75.
- [22] 叶德练, 齐瑞娟, 张明才, 等. 节水灌溉对冬小麦田土壤微生物特性、土壤酶活性和养分的调控研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(1): 224-231.
- [23] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 等. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4323-4332.
- [24] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356-2367.
- [25] Liu P, Liu Z H, Wang C B, et al. Effects of three longchain fatty acids present in peanut (*Arachis hypogaea* L.) root exudates on its own growth and the soil enzymes activities[J]. *Allelopathy Journal*, 2012, 29(1): 13-24.