

莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究^{*}

刘文全¹ 于洪军² 徐兴永¹

(1 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266061)

(2 国家深海基地管理中心, 山东青岛 266061)

摘 要 莱州湾南岸地区受海水入侵影响盐渍化问题严重, 土壤盐渍化是制约区域农业生产和发展的主要障碍因子。运用经典统计学和地统计学的方法, 研究了莱州湾南岸地区土壤剖面盐分离子的空间分异规律。结果表明: 土壤全盐含量随深度的增加而增加, 表现出底聚趋势; 各层土壤盐分离子均表现中等和强烈的变异性; 土壤盐分主要以 NaCl 和 Na₂SO₄ 的形式存在; 偏相关分析说明不同盐分离子间的相关性差异较大; 聚类分析表明盐分离子主要分为三大类: K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 为第一类, Na⁺ 单独组成第二类, Cl⁻ 则为第三类; 除全盐含量在 30 ~ 60cm 具有中等空间自相关外, 其他各层土壤盐分属性均具有强烈的空间自相关性; 盐渍化类型以硫酸盐型、氯化物—硫酸盐型和硫酸盐—氯化物型为主, 盐渍化程度以轻度盐渍化为主。

关键词 莱州湾南岸; 土壤剖面; 盐分离子; 空间分布

中图分类号 S156.4 **文献标识码** A

随着人口增长与耕地减少的矛盾日益突出, 盐碱地作为一种重要的土地后备资源, 其改良、开发和利用已成为当今世界各国关注的热点问题。了解土壤盐分离子空间变异规律是盐渍土改良和资源利用的基础。不同盐分离子在土壤中具有不同的迁移特征, 对主要土壤盐分离子进行研究可以定量掌握盐渍化地区土壤盐渍化程度、类型和分布特征, 是决定其综合治理、利用方向和制定改良措施的必不可少的工作, 同时是进行土壤盐渍化动态预报的重要依据。

莱州湾南岸位于莱州湾南部滨海平原区, 晚更新世以来该地区发生过三次较大规模的海侵事件, 形成了三个海相地层, 赋存有大量的浅层地下卤水^[1]。近年来受地下水超采影响, 地下形成巨大的漏斗区, 导致海水入侵, 引发大规模土壤盐渍化。土壤盐渍化是限制该地区农业生产和发展的重要因素, 而土壤盐渍化是导致地区土地荒漠化的一个主要原因^[2]。

研究表明, 利用地统计学并结合 GIS 技术是研究土壤特性空间变异最为有效的方法之一^[3-5]。近

年来国内外学者对土壤盐分离子迁移、分布及与环境因子关系等方面开展了较为详细的研究。刘春卿等^[6]研究了不同管理调控措施对盐渍土壤盐分分布和作物体内盐分离子吸收和分布的作用机制。王丹等^[7]研究了微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征。杨帆等^[8]对松嫩平原西部苏打盐渍土地区芦苇小区土壤盐分离子和植被群落的关系进行了分析研究。徐小元等^[9]研究了不同再生水灌溉年限对土壤盐分和离子浓度的影响。Zhu 等^[10]研究了青海湖周边土壤盐分离子的空间分布特征。Han 等^[11]分析了不同土壤盐分离子含量与燕麦的生长发育之间的关系。目前国内对于土壤盐分主要离子的相关研究集中在内陆地区, 虽然滨海地区也进行了部分研究^[12, 13], 但总体还比较薄弱。本文采用经典统计学和地统计学相结合的方法, 分析莱州湾南岸土壤盐分离子的空间分布特征及盐渍化类型, 目的在于为莱州湾南岸地区土壤系统的稳定性及区域农业可持续发展提供一定的理论依据。

^{*} 山东省科技发展计划项目(2013GHY11518)、国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(2011G19)、国家海洋局海域管理技术重点实验室基金项目(201308)共同资助

作者简介: 刘文全(1979—), 男, 青岛市人, 博士, 助理研究员, 主要从事水土资源空间变异及溶质运移研究。E-mail: liuwq@fio.org.cn

收稿日期: 2013-12-16; 收到修改稿日期: 2014-07-17

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区地理位置介于 118°38′~119°50′E, 36°45′~37°15′N 之间,行政区划上包括潍坊市的寿光、寒亭和昌邑北部地区,该地区海洋性气候特征并不明显;全年平均气温一般在 11.5~13℃;多年平均降雨量为 670~800 mm,雨量多集中在 7—9 月,占全年的 70%~80%;蒸发强烈,全区蒸降比大于 3;作物种类北部以棉花为主,南部主要为小麦、玉米、大豆和高粱等,土壤类型主要以盐化潮土为主。由于地处滨海地区,在丰水期地下水位较高,最浅埋深接近 1m,而该地区常年受海水入侵影响,含盐地下水通过毛管作用上升至地表积盐。近年来,由于该区农田排灌工程逐步完善,修筑条田,每年春季从水库引水进行灌溉洗盐,同时加强耕作管理和增施肥料,土壤盐分含量不断降低,向着淋盐、脱盐方

向转化,从而形成土壤盐分有轻有重,肥力高低不同的盐渍化土壤类型,但在年际内土壤盐分总体上呈现“积盐—淋溶”反复的动态变化。

1.2 采样设计

为了真实地反映莱州湾南岸土壤盐渍化灾害状况,考虑研究区土壤、植被、土地利用、微地貌和海水入侵等因素的影响,在 ArcGIS9.3 中配准并矢量化潍坊行政区划图,以 6 km 间距进行网格化处理,取网格交叉点为采样点,共布设 14 条断面,82 个采样点(图 1),其中 6 个采样点分布于村镇和盐池,无法进行采样,实际采集 76 个样点,每个采样点分别按 0~30、30~60 cm 和 60~90 cm 进行分层采样,0~100 cm 的土样则由每层各取三分之一样品组成混合样。采样点基于农业实际应用,大部分位于农田,部分采样点位于盐荒地、林地和草地。于 2012 年 11 月下旬进行了土壤取样,共采集 228 个样品。此时,大气降水基本结束,棉花处于收获期,地下水的消退主要靠天然蒸发,而且蒸发量较小,土壤盐分和地下水处于稳定状态。

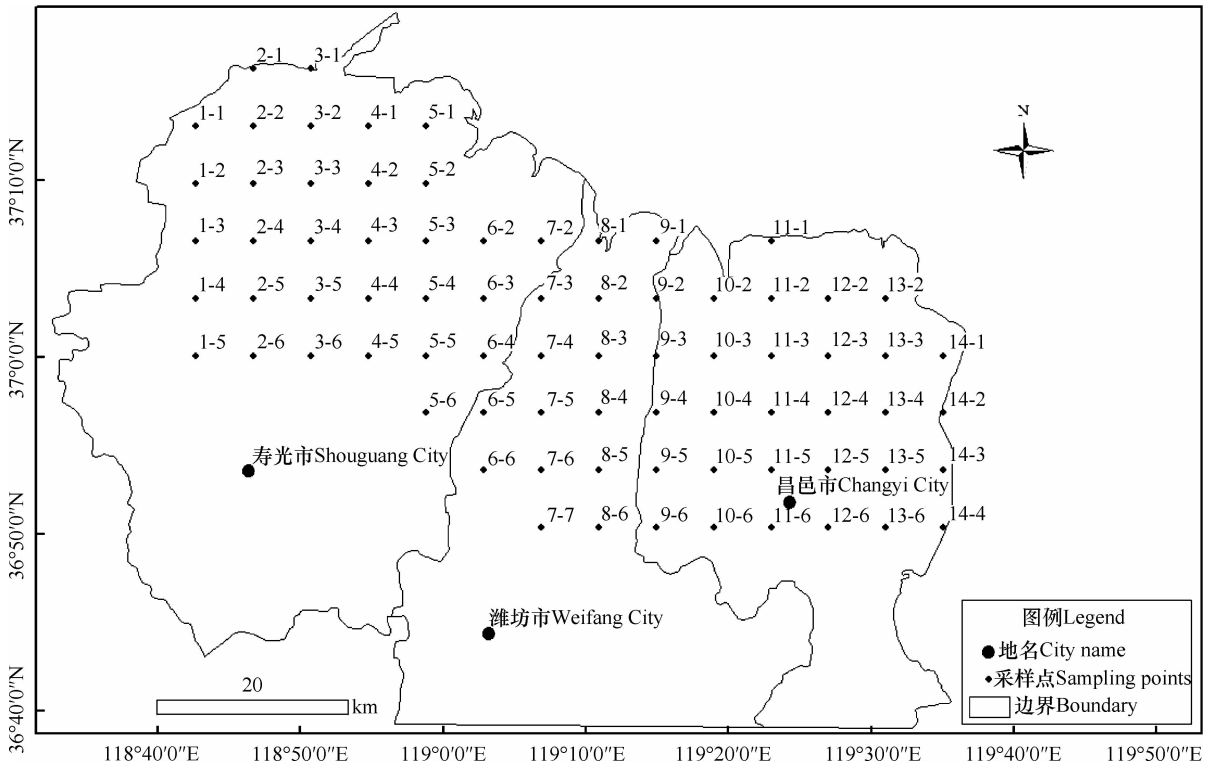


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 Geographic location of the study area and distribution of sampling points

1.3 样品分析

采集的土样在实验室自然风干,用木棍磨碎后,剔除植物残根、侵入体和新生体等,过 2 mm 孔径的筛子后待用。所有的土样均制备 1:5 土水比浸提液,

并测定其电导率;土壤全盐含量采用重量法;总溶解固体(TDS)采用 YSI EC300 型电导率仪(美国 YSI 公司生产)测定;K⁺、Na⁺ 采用火焰光度法测定;Ca²⁺、Mg²⁺ 采用 EDTA 络合滴定法测定;Cl⁻ 采用 AgNO₃滴

定法测定; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定。具体测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[14]。

1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 21 进行盐分离子的描述性统计分析和聚类分析,用 GS⁺ V9.0 进行了土壤盐分离子空间变异的地理统计学分析,确定最优拟合模型,用 ArcGIS9.3 的地理统计学模块和 Kriging 插值方法绘制了 0~100 cm 土体内土壤盐分离子、钠吸附比(SAR)和总溶解固体(TDS)、盐渍化类型($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值)、盐分含量的空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 盐分离子的基本统计特征

对 0~30、30~60、60~90 cm 和 1 m 土层盐分离子均值进行了经典统计学分析,结果见表 1。由于半方差函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[15]。进一步通过 K-S 法对数据进行正态检验发现除 Ca^{2+} 在 30~60 cm 和 1 m 土层内呈现正态分布外,其他各层土壤盐分离子均不符合正态分布,经对数转化后符合近似正态分布,半方差函数计算应采用对数转化后的数据。

从表 1 中可以看出,在整个土壤剖面中,全盐含量随着深度的增加逐渐增加,说明盐分有底聚趋势,1 m 土体的均值达到 1.90 g kg^{-1} ,按照王遵亲等^[16]关于滨海盐渍化等级划分的标准,区域总体处于轻盐渍化状态(全盐含量在 $1.0 \sim 2.0 \text{ g kg}^{-1}$ 之间),而在同一年度 6 月份该地区土壤全盐含量的研究中,1 m 土体均值高达 2.43 g kg^{-1} ,说明土壤全盐含量在年内呈下降趋势,主要是受雨季降水淋洗影响,但总体而言,土壤盐分依然是限制该区农业生产的重要因素。总溶解固体在垂向分布上表现出与全盐含量一致的趋势,总溶解固体反映了土壤中所含有的各种离子、分子与化合物的总量,与全盐含量呈正比关系^[17]。从盐分离子浓度来看,不同土层深度中各离子的浓度差异较大,说明土壤离子浓度在垂直方向上变化较大。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 在垂向上浓度逐渐增加, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在垂向上浓度则表现出逐渐降低的趋势,而且从 1 m 土体的均值可以看出, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的浓度明显高于其他三种离子,说明莱州湾南岸地区 NaCl 和 Na_2SO_4 含量较大,是该地区主要盐分存在形式。从 SAR 的统计特征值来看,随着深度的增加,二者比值逐渐变大,一方面是由于上层 Na^+ 淋溶至下层而使下层

Na^+ 含量增加,另一方面是下层 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量下降的结果。从 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值可以看出,随着深度的增加,比值从 0.62 增加至 1.30,说明盐渍化类型由氯化物-硫酸盐型过渡到硫酸盐-氯化物型;从整个区域来看, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值的均值为 0.96,属于氯化物-硫酸盐型。

从变异系数可以看出,全盐含量(TS)和总溶解固体变异系数随深度的增加而增加, K^+ 则正好相反,其他参数在垂向上没有明显的变化趋势。所有参数的变异系数均大于 10%,属于中等变异和强变异水平。从 1 m 土体可以看出,除全盐含量、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 变异系数处于 10%~100% 之间,其他参数均超过 100%,属强变异。

2.2 盐离子的相关和组成特征

土壤的盐渍化类型取决于土壤盐分中离子含量多少及所占比例,研究土壤盐分中离子间的运移关系,可以为盐渍化土壤的防治、改良和高效利用提供科学依据。在多元相关分析中,简单相关分析由于受到其他因素的影响,反映的往往是表面的而非本质的联系,因此要反映离子间的真实关系需进行偏相关分析^[18]。

从表 2 中可以看出, Cl^- 与 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 之间存在显著的正相关关系,与 Ca^{2+} 存在极显著的负相关关系,与 SAR 存在着显著的正相关关系,这与上文的分析结果基本吻合。 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 存在极显著的负相关关系; Na^+ 与 Ca^{2+} 存在极显著的负相关关系,与 SAR 的相关系数达到 0.81,存在极显著正相关关系,说明 Na^+ 浓度的增加 SAR 比值会增大,而上文的分析中也说明了这一点。 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 之间存在极显著的正相关关系,二者与 SAR 则存在极显著的负相关关系。

聚类分析是根据变量的特征按照一定的标准,将性质上相似的变量归为一类。各盐分离子是组成土壤盐分的基础,为了更清楚地了解盐分离子内部的关系,本文依据最短距离法对土壤 6 种盐分离子进行 R 型聚类分析。以距离系数阈值为 7.5 作为分类标准,6 种盐分离子可分为三大类: K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为第一类; Na^+ 单独组成第二类; Cl^- 则为第三类。聚类分析的结果进一步验证了上文所提到的在整个区域内离子含量以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 最高,因此今后进行莱州湾南岸大规模土壤盐渍化监测取样时,对这 3 种离子进行分析,就能反映该区土壤盐分含量的变化情况,从而节省人力物力。

表 1 各层土壤盐分离子的统计特征值

Table 1 Statistic eigenvalues of soil salt ions in various layers of a soil profile

项目 Items	0 ~ 30 cm					
	分布 ^①	最大值 ^②	最小值 ^③	均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数 ^⑥
TS (g kg ⁻¹) ^⑦	LN ^⑩	6.24	0.68	1.65	1.12	0.68
TDS(mg L ⁻¹) ^⑧	LN	1 420	61.20	274.1	260.00	0.95
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	LN	341.6	0.71	29.89	31.56	1.10
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	LN	485.6	4.36	43.08	50.10	1.16
K ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	49.46	0.46	6.11	7.37	1.21
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	162.1	0.63	27.31	28.29	1.04
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	29.10	0.09	4.58	4.15	0.91
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	226.1	2.48	34.97	31.30	0.90
SAR ^⑨	LN	44.66	0.31	6.84	6.87	1.00
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	LN	6.88	0.02	0.62	0.76	1.22
项目 Items	30 ~ 60 cm					
	分布 ^①	最大值 ^②	最小值 ^③	均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数 ^⑥
TS (g kg ⁻¹) ^⑦	LN ^⑩	8.53	0.70	1.88	1.57	0.84
TDS(mg L ⁻¹) ^⑧	LN	2 077	62.10	320.7	376.7	1.16
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	LN	1 021	0.14	69.56	71.15	1.02
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	LN	176.9	3.61	42.33	41.45	0.98
K ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	33.59	0.61	4.70	5.37	1.14
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	368.2	1.13	47.01	49.06	1.04
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	15.13	0.39	3.29	2.80	0.85
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	N ^⑪	73.10	3.31	22.13	14.56	0.66
SAR ^⑨	LN	79.05	0.37	14.28	17.45	1.22
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	LN	11.07	0.02	0.96	1.07	1.11
项目 Items	60 ~ 90 cm					
	分布 ^①	最大值 ^②	最小值 ^③	均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数 ^⑥
TS (g kg ⁻¹) ^⑦	LN ^⑩	13.83	0.71	1.97	1.99	1.01
TDS(mg L ⁻¹) ^⑧	LN	3 378	64.60	381.5	502.6	1.32
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	LN	1 484	0.37	95.53	102.7	1.08
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	LN	302.2	4.75	49.58	51.65	1.04
K ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	31.30	0.49	4.58	4.91	1.07
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	601.6	1.30	57.76	58.87	1.02
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	46.66	0.34	3.97	4.02	1.01
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	121.0	2.93	24.95	24.16	0.97
SAR ^⑨	LN	65.71	0.43	15.76	16.17	1.03
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	LN	10.08	0.03	1.30	1.54	1.18
项目 Items	0 ~ 100 cm					
	分布 ^①	最大值 ^②	最小值 ^③	均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数 ^⑥
TS (g kg ⁻¹) ^⑦	LN ^⑩	8.70	0.74	1.90	1.54	0.81
TDS(mg L ⁻¹) ^⑧	LN	1 691	66.00	325.4	31.74	1.03
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	LN	657.5	0.80	64.99	72.45	1.11
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	LN	288.6	4.95	45.00	47.92	1.06
K ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	32.31	0.93	5.13	5.68	1.11
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	LN	295.5	1.13	44.05	50.16	1.14
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	LN	17.27	0.59	3.95	3.25	0.82
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	N ^⑪	123.4	3.56	27.35	19.02	0.69
SAR ^⑨	LN	59.66	0.37	12.29	13.73	1.12
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	LN	8.40	0.04	0.96	1.03	1.07

①Distribution, ②Maximum, ③Minimum, ④Mean, ⑤Standard deviation, ⑥Coefficient of variation, ⑦全盐量 Total salt content, ⑧总溶解固体 Total dissolved solid, ⑨钠吸附比 Sodium absorption ratio, ⑩对数正态 Logarithm normal, ⑪正态 Normal

表 2 盐分离子的偏相关矩阵
Table 2 Partial correlation matrix of salt ions

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SAR	Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻
Cl ⁻	1.000							
SO ₄ ²⁻	0.402 **	1.000						
K ⁺	0.130	-0.041	1.000					
Na ⁺	0.512 **	0.020	-0.099	1.000				
Mg ²⁺	-0.117	-0.380 **	0.109	-0.251	1.000			
Ca ²⁺	-0.327 **	-0.538 **	0.074	-0.439 **	0.604 **	1.000		
SAR	0.249 *	-0.058	-0.119	0.810 **	-0.493 **	-0.694 **	1.000	
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	0.672 **	-0.439 **	0.130	0.147	-0.054	-0.124	0.055	1.000

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关 Note: ** Significant correlation at the 0.01 level. * Significant correlation at the 0.05 level

2.3 盐分离子的空间结构特征

由于经典统计学只能反映各层土壤盐分离子整体状况,不能定量刻画土壤盐分离子的随机性与结构性、独立性和相关性,因此,需利用地统计学方法做进一步的分析与探讨。本文利用 GS⁺ V9.0 软件对不同土壤层次土壤盐分离子的空间变异性进行了分析,用球状、指数和高斯模型等进行模型拟合,得到模型的相关参数值,选取决定系数 R^2 接近于 1 和残差平方 (RSS) 较小的模型来模拟各盐分离子的空间分布情况。各层土壤盐分离子的半方差模型见表 3。

从表 3 中可以看出,各层土壤盐分离子的理论模型以指数模型为主,部分离子的空间分布符合球状和高斯模型。 C_0 表示块金值; $C_0 + C$ 表示基台值; $C_0 / (C_0 + C)$ 表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例,它反映了土壤属性的空间自相关性的程度,常被用作研究变量空间相关的分类依据^[19]。如果 $C_0 / (C_0 + C)$ 小于 25%,表现强空间相关性;在 25% ~ 75% 之间,空间相关性中等;大于 75%,空间相关性很弱;若比值接近于 1,说明在整个尺度上具有恒定的变异^[20]。各土层盐分离子的块金值 C_0 均为正值,说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的正基底效应。除全盐含量在 30 ~ 60 cm 土层块基比为 42%,具有中等空间自相关外,其他各层均具有强烈的空间自相关性,说明各层土壤盐分离子属性的空间变异是由自然因素(如气候、成土母质、微地貌和土壤类型等)影响。从变程来看,各层盐分离子的变化范围在 6.10 ~ 31.29 km 之间,均超过实际样点间隔 6 km,说明取样间距比较合理,能反映出土壤各层

盐分离子的空间自相关关系。所有模型的 R^2 接近于 1 且 RSS 较小,说明模型可以准确地反映各层土壤盐分离子的空间分布状况。

2.4 盐分离子的空间分布特征

通过 ArcGIS 9.3 的地统计分析模块,对 1 m 土体内 6 种盐分离子、总溶解固体 (TDS) 和钠吸附比 (SAR) 的空间分布,Cl⁻ / SO₄²⁻ 比值和土壤全盐含量分级进行了空间插值分析(图 2、图 3 和图 4)。

Kriging 插值具有平滑曲线的功能,使得高值降低、低值增高,从而减少了土壤属性的急剧变化^[21]。从图 2 可以看出,各土壤盐分离子及其他属性的空间分布均表现出一定的条带状与斑块状格局。从 6 种盐分离子的空间分布来看,Ca²⁺ 的空间分布中间较高,南北略低;Mg²⁺ 以北部低,南部和西部高;K⁺ 则表现出北部高中部低的特征;Na⁺、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 三种离子在空间分布上类似,表现出中部高,北部次之,南部较低的趋势,这主要是由于北部靠近莱州湾,同时长期受地下海水入侵侧渗的影响导致该区域三种离子含量较高。SAR 的空间分布表现出与 Na⁺ 一致的空间分布,这与研究区阳离子以 Na⁺ 为主有关。TDS 与全盐含量存在正比关系,因此它的分布趋势与研究区三种主要离子 Na⁺、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 的分布趋势类似。从图 3 中的 Cl⁻ / SO₄²⁻ 比值可以看出,研究区以硫酸盐型 (<0.5)、氯化物—硫酸盐型(0.5 ~ 1) 和硫酸盐—氯化物型(1 ~ 4) 为主,氯化物型 (>4) 的面积最小,主要分布于寿光北部沿海一线。从图 4 可以看出,研究区的全盐含量呈条带状分布,从滨海至内陆盐分含量逐渐降低,研究区北部沿海地区盐渍化最为严重,研究区东部则较轻,主要原因是研究区东边界是胶莱河,靠近

表 3 各层盐分离子的半方差函数理论模型参数

Table 3 Parameters of the semi-variogram model for soil salts in each soil layer

项目		0 ~ 30 cm					
Items	理论模型 ^①	块金值 ^②	基台值 ^③	块基比 ^④	变程 ^⑤ (km)	决定系数 ^⑥	残差 ^⑦
TS (g kg ⁻¹) ^⑧	指数 Exponential	0.03	0.26	0.11	9.33	0.83	0.002
TDS (mg L ⁻¹) ^⑨	球状 Spherical	0.10	0.47	0.21	7.18	0.79	0.002
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	球状 Spherical	0.43	2.28	0.19	7.18	0.67	0.070
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	球状 Spherical	0.12	0.89	0.13	7.18	0.61	0.006
K ⁺ (mg L ⁻¹)	高斯 Gaussian	0.12	0.60	0.20	6.24	0.74	0.002
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.21	1.43	0.15	6.89	0.66	0.032
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	球状 Spherical	0.09	0.61	0.15	8.24	0.72	0.006
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.13	0.53	0.24	6.92	0.71	0.003
SAR ^⑩	指数 Exponential	0.08	1.17	0.07	6.19	0.65	0.037
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	指数 Exponential	0.14	1.19	0.12	10.83	0.54	0.012
项目		30 ~ 60 cm					
Items	理论模型 ^①	块金值 ^②	基台值 ^③	块基比 ^④	变程 ^⑤ (km)	决定系数 ^⑥	残差 ^⑦
TS (g kg ⁻¹) ^⑧	指数 Exponential	0.15	0.36	0.42	31.29	0.68	0.003
TDS (mg L ⁻¹) ^⑨	指数 Exponential	0.08	0.55	0.14	6.84	0.62	0.008
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.29	2.88	0.10	8.16	0.51	0.034
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.08	0.87	0.09	9.48	0.73	0.015
K ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.12	0.79	0.15	17.91	0.91	0.004
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.12	1.43	0.08	8.46	0.53	0.008
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	球状 Spherical	0.09	0.60	0.15	9.51	0.46	0.013
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.24	1.02	0.23	7.31	0.55	0.028
SAR ^⑩	指数 Exponential	0.14	1.34	0.10	6.27	0.61	0.015
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	指数 Exponential	0.11	1.58	0.07	7.86	0.65	0.042
项目		60 ~ 90 cm					
Items	理论模型 ^①	块金值 ^②	基台值 ^③	块基比 ^④	变程 ^⑤ (km)	决定系数 ^⑥	残差 ^⑦
TS (g kg ⁻¹) ^⑧	指数 Exponential	0.08	0.36	0.22	6.90	0.52	0.005
TDS (mg L ⁻¹) ^⑨	指数 Exponential	0.06	0.64	0.09	7.92	0.48	0.014
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.21	3.10	0.07	9.75	0.37	0.159
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.09	0.92	0.10	11.25	0.42	0.029
K ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.21	0.86	0.23	16.41	0.73	0.013
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.16	1.38	0.12	8.52	0.63	0.014
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	球状 Spherical	0.15	0.93	0.16	8.73	0.54	0.030
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.05	0.65	0.08	6.54	0.44	0.148
SAR ^⑩	球状 Spherical	0.17	1.28	0.13	9.01	0.46	0.023
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	指数 Exponential	0.13	1.69	0.08	9.54	0.52	0.042
项目		0 ~ 100 cm					
Items	理论模型 ^①	块金值 ^②	基台值 ^③	块基比 ^④	变程 ^⑤ (km)	决定系数 ^⑥	残差 ^⑦
TS (g kg ⁻¹) ^⑧	指数 Exponential	0.02	0.30	0.07	13.50	0.39	0.003
TDS (mg L ⁻¹) ^⑨	指数 Exponential	0.04	0.50	0.08	6.21	0.62	0.006
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.20	1.92	0.10	10.32	0.59	0.068
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.08	0.74	0.11	10.14	0.49	0.015
K ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.12	0.62	0.19	16.41	0.80	0.005
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.23	1.20	0.19	8.31	0.55	0.004
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.04	0.47	0.08	6.43	0.41	0.004
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	指数 Exponential	0.07	0.39	0.18	6.15	0.37	0.025
SAR ^⑩	指数 Exponential	0.22	1.16	0.18	6.63	0.51	0.008
Cl ⁻ / SO ₄ ²⁻	指数 Exponential	0.12	1.31	0.09	11.55	0.48	0.024

①Theoretical model, ②Nugget, ③Sill, ④Nugget and sill ratio, ⑤Range, ⑥Coefficient of determination, ⑦Residual, ⑧Total salt content, ⑨Total dissolved solid, ⑩Sodium absorption ratio

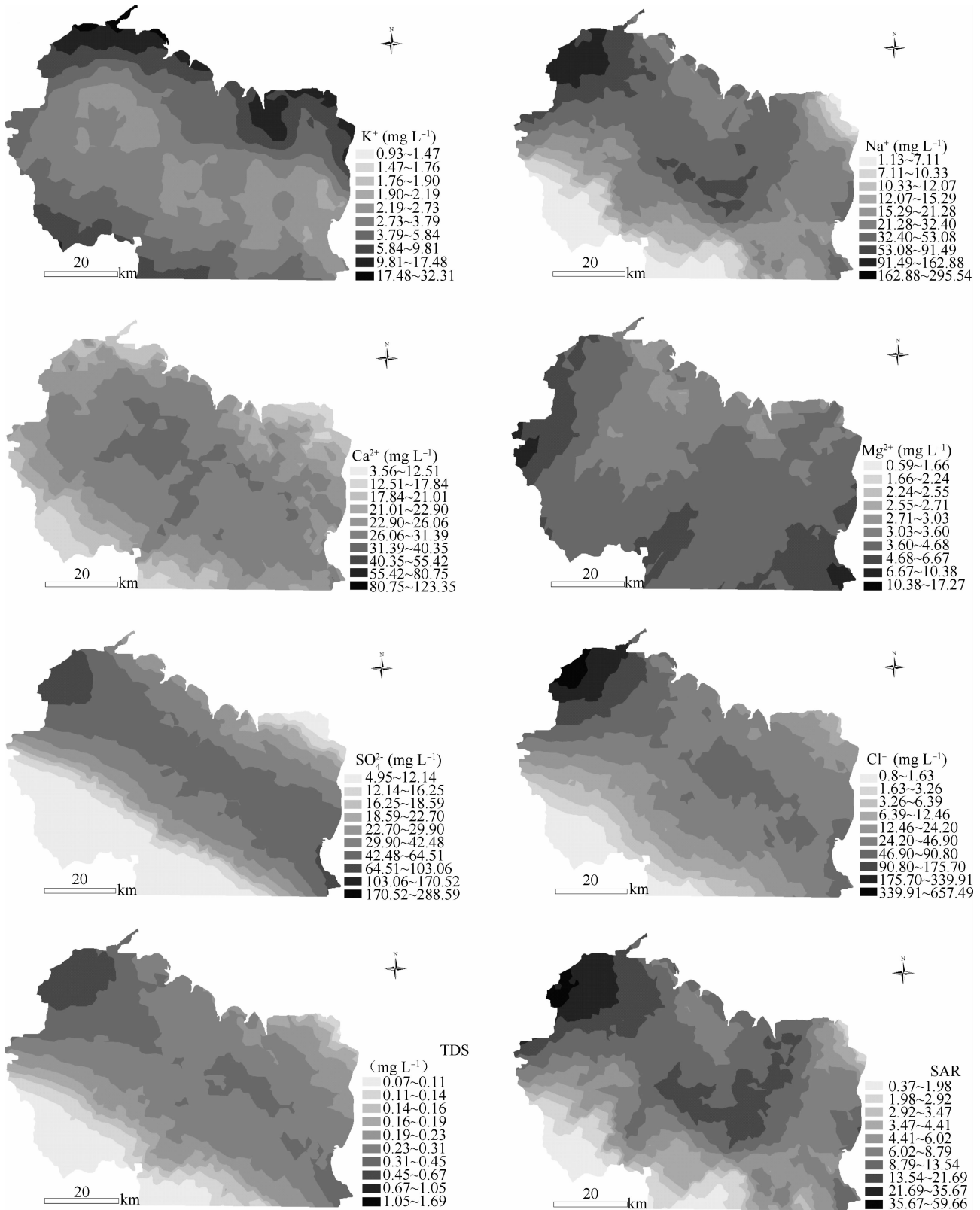


图2 盐离子的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of salt ions

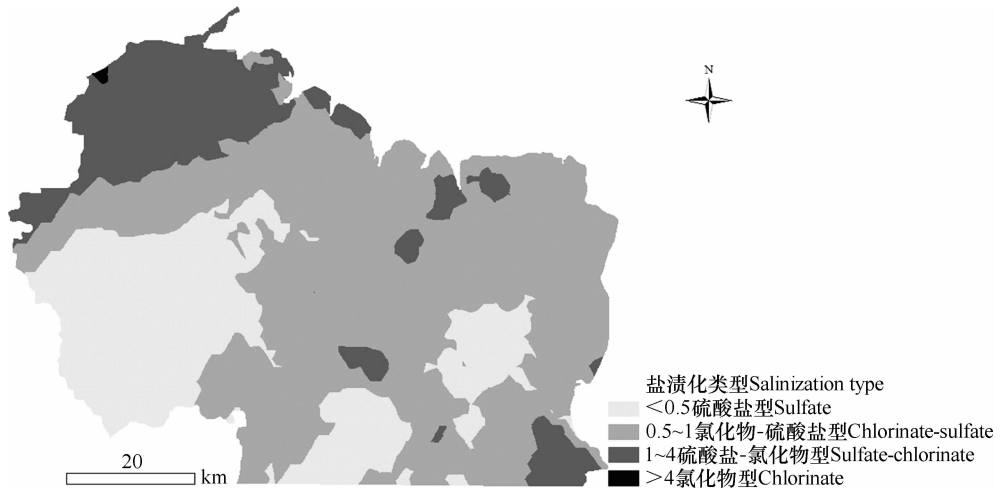


图3 盐渍化类型图

Fig. 3 Salinization type map

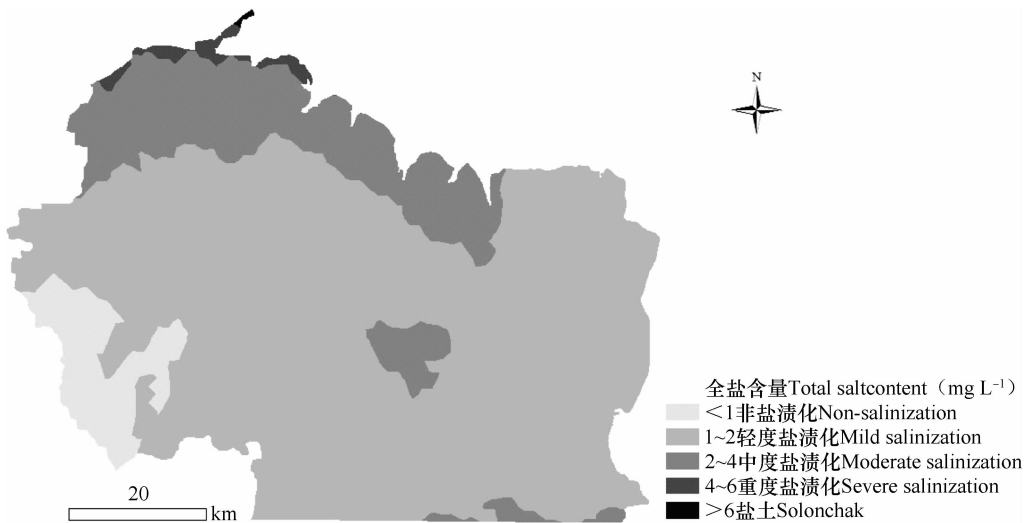


图4 盐分含量分级图

Fig. 4 Salinity content grading map

海边的地方修建了防潮大坝,大坝内侧积蓄淡水供两岸进行农业灌溉,虽然也受海水入侵的影响,但受胶莱河补给地下水的影 响,一定程度淡化了海水入侵的影响,盐渍化程度较轻。整个研究区总体以轻度盐渍化为主,中度盐渍化次之,以重盐渍化、盐土和非盐渍化的面积最小,说明盐渍化问题将继续困扰该区的农业生产和发展,今后应加大水利调控,加强耕作管理措施,科学合理施肥,同时要控制地下水的开采量,防止发生更大规模的海水入侵。

3 结 论

国内目前对盐渍化问题的研究主要集中在内陆干旱半干旱地区,本文针对莱州湾南岸滨海地区

的盐渍化问题,从区域农业生产和盐渍化评估的实际需求出发,对土壤盐离子开展了一系列分析研究,获得了很好的结果。在研究区整个土壤剖面上,土壤盐分含量底聚趋势明显。该区土壤盐分的主导离子为 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,以 NaCl 和 Na_2SO_4 的形式存在,这也为今后在该地区开展盐渍化监测和评估工作提供了参考,通过分析这三种离子完全可以反映莱州湾南岸地区的盐渍化问题。聚类分析表明该地区土壤盐离子主要分为三大类: K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为第一类; Na^+ 单独组成第二类; Cl^- 则为第三类。土壤盐离子的空间分布均表现出一定的条带状与斑块状格局。研究区盐渍化类型以硫酸盐型、氯化物—硫酸盐型和硫酸盐—氯化物型为主,盐渍化程度以轻盐渍化为主,中度盐渍

化次之,以重盐渍化、盐土和非盐渍化的面积最小。研究结果对该区的农业生产及盐渍土的科学改良、综合利用具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 韩有松,孟广兰,王少青,等. 中国北方沿海第四纪地下卤水. 北京:科学出版社,1996. Han Y S, Meng G L, Wang S Q, et al. Subsurface brine of the Quaternary Period along the coast of northern China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996
- [2] Amezketta E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pro-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 594—606
- [3] 李艳,史舟,王人潮. 基于 GIS 的土壤盐分时空变异及分区管理研究——以浙江省上虞市海涂围垦区为例. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 121—129. Li Y, Shi Z, Wang R C. Study on spatio-temporal variability of soil salinity and site-specific management zones based on GIS—A case study on coastal saline region in Zhejiang Province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 121—129
- [4] 姚荣江,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61—66. Yao R J, Yang J S, Liu G M, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 61—66
- [5] Li X M, Yang J S, Liu M X, et al. Spatio-temporal changes of soil salinity in arid areas of South Xinjiang using electromagnetic induction. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(8): 1365—1376
- [6] 刘春卿,杨劲松,陈德明. 管理调控措施对土壤盐分分布和作物体内盐分离子吸收的作用. *土壤学报*, 2004, 41(2): 230—236. Liu C Q, Yang J S, Chen D M. Effect of regulatory measures on distribution of soil salt and ionic uptake by crop (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 230—236
- [7] 王丹,康跃虎,万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 83—87. Wang D, Kang Y H, Wan S Q. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 83—87
- [8] 杨帆,邓伟,章光新,等. 苏打盐渍土地区芦苇地土壤盐分离子空间变异与群落关系研究. *土壤学报*, 2008, 45(4): 594—600. Yang F, Deng W, Zhang G X, et al. Spatial variation of soil saline ions and its relations with vegetation community of *Phragmites australis* in saline-sodic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 594—600
- [9] 徐小元,孙维红,吴文勇,等. 再生水灌溉对典型土壤盐分和离子浓度的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 34—39. Xu X Y, Sun W H, Wu W Y, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on soil salt and ion content in Beijing (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 34—39
- [10] Zhu J F, Chen K L, Cao S K, et al. Spatial variability analysis of soil salt and its component ions in Qinghai Lake Region. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2431—2436
- [11] Han L P, Liu H T, Yu S H, et al. Potential application of oat for phytoremediation of salt ions in coastal saline-alkali soil. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 274—281
- [12] 刘文全,于洪军,徐兴永,等. 基于地统计学的莱州湾南岸土壤盐分离子的空间变异性研究. *安徽农业科学*, 2012, 40(8): 4802—4805. Liu W Q, Yu H J, Xu X Y, et al. Spatial variability of salt ions in Southern area of Laizhou Bay based on geostatistics (In Chinese). *Journal of Anhui Agriculture*, 2012, 40(8): 4802—4805
- [13] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 106—112. Yao R J, Yang J S. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soils in the Yellow River Delta (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(11): 106—112
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [15] 李哈滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651—657. Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651—657
- [16] 王遵亲,等. 中国盐渍土. 北京:科学出版社,1993. 84—85. Wang Z Q, et al. Salt-affected soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993: 84—85
- [17] 王春霞,王全九,刘建军,等. 灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 28—33. Wang C X, Wang Q J, Liu J J, et al. Effects of mineralization of irrigation water and soil salinity on cotton emergence rate in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 28—33
- [18] 陈胜可,等. SPSS 统计分析——从入门到精通. 北京:清华大学出版社, 2010. Chen S K, et al. SPSS statistical analysis—From entry to the master (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2010
- [19] Chine Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan. *Soil Science*, 1997, 162: 281—297
- [20] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557—563. Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557—563
- [21] 陈广泉,刘文全,于洪军,等. 基于 GIS 的莱州湾南岸土壤盐渍化特征分析研究. *海洋科学进展*, 2012, 30(4): 501—507. Chen G Q, Liu W Q, Yu H J, et al. Analysis of soil salinization in the southern Laizhou Bay Based on GIS (In Chinese). *Advances in Marine Science*, 2012, 30(4): 501—507

RULES OF VARIATION OF SALT IONS IN SOIL PROFILES IN SOUTH COASTAL AREA OF LAIZHOU BAY

Liu Wenquan¹ Yu Hongjun² Xu Xingyong¹

(1 *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China*)

(2 *National Deep Sea Center, Qingdao, Shandong 266061, China*)

Abstract The south coastal area of the Laizhou Bay is seriously subjected to soil salinization as a result of seawater intrusion. Soil salinization has become a major factor that hinders the regional agricultural production and development. In order to explore rules of the spatial distribution of salt ions and dominant salt ions in soil profiles in the research area, 14 sampling sections were arranged at 6km intervals in this study, containing 76 soil profiles. Soil samples were collected from the 0 ~ 30cm, 30 ~ 60cm and 60 ~ 90cm soil layers, separately, of each profile. A portion (about 1/3) of each sample was taken out from the same soil profile and blended into a mix for analysis. Classical statistical and geo-statistical methods were used in combination to analyze statistical characteristics and spatial distribution of salt ions in the soil profiles in the area. Cluster analyses of the soil ions were also done. Results show that within the 0 ~ 1m soil layer, soil salts displayed an obvious trend of accumulating in the bottom; The dominant soil salt ions in the research area were Na^+ , SO_4^{2-} and Cl^- , existing in the form of NaCl and Na_2SO_4 . These findings may serve as reference for the future researches on monitoring and assessment of soil salinization in this area. The analyses of the three ions in the soil has fully explained the problem of soil salinization in the south coastal area of the Laizhou Bay. Partial correlation analysis of the salt ions in the soil shows that the ions varied sharply. Cluster analysis indicates that the salt ions in the soil consisted mainly of three categories of salt ions: Category I: K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and SO_4^{2-} ; Category II: Na^+ , and Category III: Cl^- . The total salt content displayed a moderate spatial autocorrelation in the 30 ~ 60cm soil layer, and strong ones in the other two layers, which suggests that the spatial variation of the soil salt properties was mainly affected by natural factors. Spatial distribution of the salt ions in the soil appeared in pattern of strips and patches. Ca^{2+} concentration was relatively high in the middle, and slightly lower in the northern and southern parts of the region; Mg^{2+} was relatively high in the southern and western parts and relatively low in the northern part; K^+ was relatively high in the northern part and low in the central part; while Na^+ , SO_4^{2-} and Cl^- was quite similar in spatial distribution, appearing to be high in the central part, relatively low in the northern part and lower in the southern part. SAR was quite similar to Na^+ in spatial distribution pattern. The soil salinization in this region was mainly of the types of sulfate, chloride-sulfate and sulfate-chloride, and was quite low in degree in most parts of the region and moderate in some parts, leaving some small areas of severely salt-affected soil, saline soil and non-salt-affected. The research findings may have guiding significance for agricultural production in the region, as well as for scientific amelioration and comprehensive utilization of salt-affected soils in the study area.

Key words South coastal area of the Laizhou Bay; Soil profile; Salt ions; Spatial distribution

(责任编辑:檀满枝)