

河北滨海平原土壤盐分空间异质性与淋排均质化作用研究^①

于淑会^{1,2}, 白璐^{1,2}, 刘慧涛¹, 刘金铜^{1*}

(1 中国科学院农业水资源重点实验室, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文运用经典统计学和地统计学方法, 结合 GIS 技术, 研究了滨海盐土土壤盐分的空间异质性和采用降雨淋盐与暗管排盐措施后土壤盐分变化及淋排均质化作用的分析, 主要结果如下: 雨淋管排可促进土壤盐分均质化。淋排后, 变异系数 CV 由 48.13% 降至 28.14%, 空间相关程度($C_0/(C_0+C)$)由 72.86% 变化至 59.42%; 雨淋管排后土壤盐分存在“高盐异质性–低盐均质性”转化趋势。 $<7\text{ g/kg}$ 的土壤含盐量经雨季淋排可降至 $1.5\sim 2\text{ g/kg}$, 且在 $<7\text{ g/kg}$ 土壤含盐量范围内, 脱盐率与初始土壤含盐量呈正相关, 反之, 为负相关; 对“高盐异质性–低盐均质性”转化过程的定量分析结果显示, 淋排后, 实验区土壤类型由中重度盐渍化土降为轻度盐渍化土, 雨季土壤脱盐量为 67.78 t , 其中重度盐渍化土对脱盐量的贡献最大, 可达 91%, 轻度盐渍化土反而因淋排作用有所增加, 其脱盐量的贡献为负值(–35%)。

关键词: 土壤盐分; 空间变异; 暗管排水; 均质化作用; 地统计分析

中图分类号: S278; S154.1

河北滨海平原的地下水埋深极浅, 因此地下水与地表水交换异常频繁, 非饱和土壤层内土壤水水平方向上的空间非均质性直接导致不同空间点处盐分通量的差异, 从而引起表层土壤盐分积累与空间分布的非均质性^[1]。土壤盐分的时空变异性与地下水埋深之间的关系在一定程度上反映了土壤耕作层内的盐渍化程度和状态^[2], 地下水埋深越浅, 表层土壤含盐量越高^[3]。土壤水盐分布的空间变异特征可为农田水管理及农业生产管理提供理论支撑^[4–6], 是农业分区精准治理的理论依据。

石元春和辛德惠^[7]指出高水位盐碱区盐渍化严重的主要原因是土壤水分蒸发导致的表层土壤盐分累积和高潜水位顶托作用对土壤水盐运动的影响, 土壤盐分淋洗需克服蒸发力和顶托力, 因此高水位盐碱区治理必须配合水利措施降低地下水位。暗管排水可以降低地下水位, 延长毛管水上升路径, 从而减少盐分在地表的累积, 有效抑制土壤次生盐渍化^[8]。而且, 通过排水降低地下水位可增加土壤积蓄淡水库容的能力, 从而增加盐分淋洗率^[9]。于淑会等^[10]研究表明在雨季进行暗管排水, 可减少连续强降水造成的

作物涝渍时间 $2/3$ 以上, 雨季后土壤脱盐率提高 1 倍以上, 刘永等^[11]也认为丰水期(7—9月)地下暗管的脱盐效果较好。

灌溉或降水的淋洗作用及暗管的排水排盐作用会改变土壤水盐固有的运移规律^[12], 从而影响土壤水盐的空间分布。有研究表明暗管排水会改变土壤水分的时空分布特征, 从而引起土壤盐分时空分布的变化, 暗管排水后样点空间自相关距离及空间相关结构的异质性(半方差函数值)都有不同程度的增加, 暗管排水引起的小尺度变异增加可能是导致空间相关结构异质性增加的原因^[13]。灌溉对于土壤盐分空间分布的影响在于大幅降低土壤含盐量, 从而很大程度上缩小盐碱区面积^[14], 但由于灌溉量与灌溉时间存在差异, 灌溉后土壤盐分变异性强于灌溉前^[15]。

河北滨海平原属半湿润季风气候带, 全年降水集中在雨季(6—9月), 农田尺度上降水均匀且集中, 配套有暗管排水系统, 雨季将是很好的盐分淋洗时期。与灌溉不同, 农田尺度空间点上的降水是均匀下降、缓慢下渗的。目前国内外对雨季暗管淋排作用对土壤盐分空间异质性的影响研究尚不多, 本文就雨季暗管

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201311060)资助。

* 通讯作者(jtliu@sjziam.ac.cn)

作者简介: 于淑会(1985—), 女, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为盐碱地土壤水盐运移。E-mail: yushuhui126@126.com

淋排、无灌溉条件下为土壤盐分空间异质性进行了研究,并从土壤脱盐特征及淋排前后不同盐渍化等级变化特点展开详细分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于河北省沧州市东部滨海区南大港农场的国土资源部/中国科学院暗管排盐实验区,面积为 6.8 hm^2 。南大港管理区位于渤海湾西岸,中心坐标为 $38^\circ 31' 48.78'' \text{N}$, $117^\circ 25' 43.15'' \text{E}$, 距离渤海海岸线约为 10 km , 属华北冲积平原黑龙港流域的最东端,是地势低平的滨海平原,地貌有众多坑塘和洼淀。气候属于温带大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季秋高气爽,冬季寒冷少雪。年平均降雨量 590 mm , 其中 75% 集中在雨季(6—9月),年潜在蒸发量 $1\,950 \text{ mm}$, 雨热同季。该区具有典型的季风气候特点,干湿季节分明,土壤水分和盐分在垂直方向的上行与下行、积盐与脱盐过程具有鲜明的季节性特点^[16]。该区除引黄河水用于饮用及湿地生态需水外,无其他淡水补给,区内地下水矿化度高且地下水埋深浅($0.3 \sim 1.2 \text{ m}$),地下水含盐量为 $6 \sim 10 \text{ g/L}$,春季多风期地下水携盐上移,土壤次生盐渍化严重,农作物以耐盐作物棉花为主。实验区耕层土壤渗透系数 $0.33 \sim 1.25 \text{ m/d}$, 深层土壤侧渗系数约为 $6 \sim 8 \text{ m/d}$, 这与深层土壤存在大孔隙有关。土质以黏性土为主,局部地区深层土壤出现砂质土。

1.2 暗管排水排盐系统

试验区内布设有暗管排水排盐系统,该系统渗水管采用直径 11 cm 的带孔单壁波纹管,外包 15 cm 厚砂石滤料,坡降比 0.7% , 渗水管呈南北向铺设,铺设总长为 $1\,100 \text{ m}$, 平均深度 1.3 m , 间距 35 m , 系统内建设集水池与小型泵站排水,风力发电与柴油发电提供强排水动力。

根据试验区高水位盐碱地高水位和季风气候的特征,试验中暗管淋排系统选择春季冻融后期和雨季作为两个关键时间点进行控制性排水来调控春季盐分上升和雨季盐分淋洗与涝害。本文关注的重点是雨季暗管淋洗下土壤盐分空间异质性的演变,因此只研究雨季暗管淋排作用下的土壤盐分空间异质性特征。根据沈荣开等^[17]提出的 30 cm 的淹水深度(涝害发生的最小埋深)与试验区的临界水位 $80 \sim 120 \text{ cm}$, 确定雨季暗管淋排调控地下水埋深阈值为 $30 \sim 100 \text{ cm}$ 。

1.3 采样与分析

1.3.1 采样 试验区地处季风气候区,全年降雨集

中在雨季(6—9月),无其他灌溉水资源,雨季期间才可发生雨淋管排降盐作用。因此,本研究于雨季来临前的 2012 年 6 月和雨季结束后的 2012 年 8 月取样,期间降雨量为 435.8 mm 。采样时,均匀布点,间隔为 20 m , 全区共布设 167 个点(图 1)。土钻取土,取样深度为 $0 \sim 25 \text{ cm}$, 样品用自封袋与铝盒独立封存,送至中科院南皮试验站实验室进行室内测定。每个样点用全站仪进行定位,同时获取采样点的相对高程。

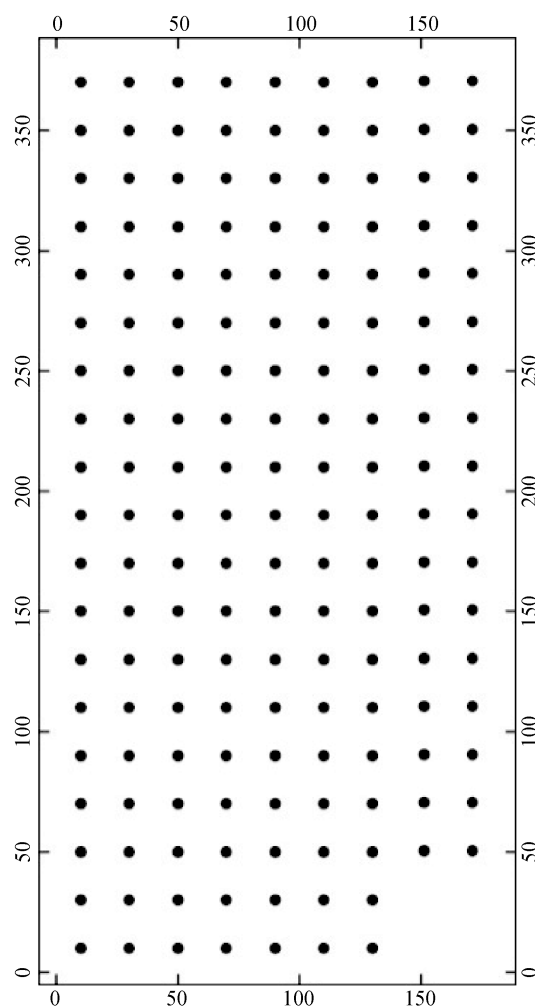


图 1 采样点位置图(m)

Fig. 1 Layout of soil sampling sites

铝盒内样品用于烘干法测定含水量^[18], 对自封袋内样品风干、碾碎, 过 2 mm 筛, 然后以 $5:1$ 的水土比进行抽滤浸提进行土壤盐分的测定。滴定法测定土壤盐分离子含量^[18], 主要离子有 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- , 土壤含盐量取离子含量之和。

1.3.2 分析 采用 SPSS16.0 软件对土壤含盐量数据进行正态化处理及基本统计分析, 用 VarioWin 软件进行土壤含盐量数据的半方差函数分析, 用 ArcGIS 9.3 软件输出土壤盐分空间分布图。对于土壤

含盐量的影响因子分析采用线性回归分析,分析软件为 SPSS 16.0,用 Excel 2007 进行雨季土壤脱盐与盐分均质化的分析。

2 结果与分析

2.1 淋排前后土壤盐分空间异质性特点

2.1.1 淋排前后土壤盐分的基本统计特征 对雨季淋排前后 167 个土壤样品的含盐量数据进行正态

化处理,得到雨季淋排前后土壤盐分的基本统计特征(表 1),淋排前土壤含盐量远远高于淋排后,最大值高达 11.90 g/kg,土壤平均含盐量也由淋排前的 4.28 g/kg 降至 1.67 g/kg。变异系数 CV 值反映样点的离散程度,淋排前后土壤含盐量均表现为中等程度变异性^[19]($10\% \leq CV \leq 100\%$),但淋排前变异程度强于淋排后,由 48.13% 降为 28.14%,说明了雨淋管排具有降低土壤含盐量空间异质性的作用。

表 1 土壤含盐量统计特征值
Table 1 Statistical characteristic values of soil salinity

取样时间	样点数	分布类型	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	均值±标准误 (g/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S
淋排前	161	lgN	1.40	11.90	4.28 ± 2.06	48.13%	0.28	-0.76	0.749
淋排后	157	lgN	0.86	3.15	1.67 ± 0.47	28.14%	0.32	-0.13	0.565

注：对数正态分布；正态化处理后的数值。

2.1.2 淋排前后土壤盐分的地统计特征 土壤特性是一种区域化变量,同时具有地质结构的特性和统计学的随机特性,国内外很多学者将地统计学理论应用于土壤科学进行土壤特性空间变异性规律的研究^[20-21]。地统计学主要由数据空间分布的变异函数及其参数(表 2,图 2)与空间局部估计的克里金插值(图 3)组成。块金值(Nugget)代表随机变异和最小采样间距内的变异,而基台值表示变量空间变异的结构性方差,可反映变量变化幅度或系统的总变异程度;

块金效应($C_0/(C_0+C)$)表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比列,可反映变量的空间相关程度,变程表示变量具有自相关性的尺度^[22]。

表 2 土壤盐分半方差函数模型参数
Table 2 Parameters of semivariogram models of soil salinity

采样时间	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $C_0/(C_0+C)(\%)$	变程 (m)
淋排前	球状	0.051	0.070	72.86	95.19
淋排后	球状	0.041	0.069	59.42	75.60

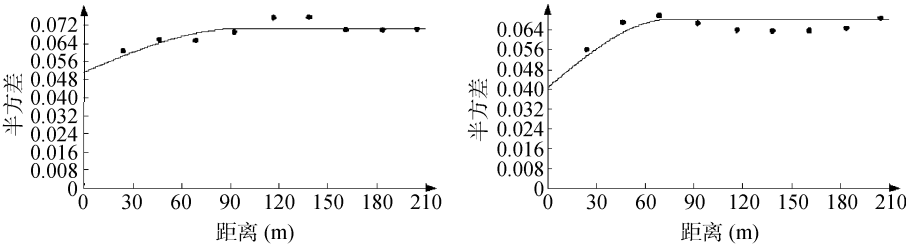


图 2 淋排前后土壤盐分半方差函数模型
Fig. 2 Semivariogram models of soil salinity before and after salt leaching

淋排前后土壤盐分空间分布的块金值均为大于 0 的正值,说明其内部存在着由于采样误差、随机变异等引起的正基底效应,淋排前土壤盐分空间分布的变程为 95.19 m,块金效应接近 75%,表现为偏弱的中等空间自相关程度^[23]($25\% \leq C_0/(C_0+C) \leq 75\%$),说明淋排前土壤盐分受随机性因素影响较大,变异程度较强,这与基本统计分析的结果是一致的;淋排后土壤盐分空间分布及其特点发生改变,变程仅为 75.26 m,盐分空间分布表现为中等相关性^[23]($25\% \leq C_0/(C_0+C) \leq 75\%$),盐分空间分布受结构性因素(土壤类型、母质等)与随机性因素(微地形差异等)共同影响。

上述地统计学特征说明了淋排后土壤含盐量空

间分布的结构性增强,受随机因素影响减弱,反映了土壤含盐量空间的均质性变化趋势。

2.1.3 淋排前后土壤盐分的空间分布特征 将 VarioWin 分析得到的土壤盐分半方差函数模型参数(表 2)输入 ArcGIS 地统计模块进行普通克里格插值得到淋排前后的土壤盐分空间分布图(图 3)。可以看出,试验区北部地势较低处土壤含盐量相对较高,淋排前土壤含盐量一般在 2 ~ 8 g/kg,属中重度盐渍化土^[24],图中盐分分布等级间隔约为 1 g/kg,说明盐分空间分布异质性较大;淋排后土壤含盐量为 1 ~ 2 g/kg,属轻度盐渍化土^[24],盐分分布等级间隔约为 0.1 g/kg,说明盐分空间分布异质性较小,这说明了雨季降水淋

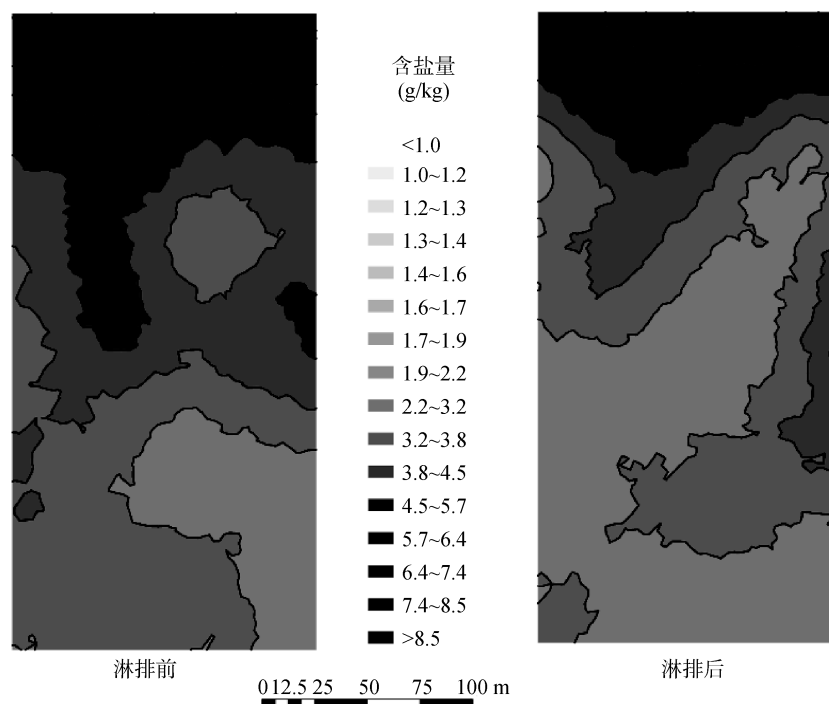


图 3 淋排前后土壤盐分空间分布图

Fig. 3 Spatial distributions of soil salinity before and after salt leaching

洗与暗管排水改变了土壤盐分的空间分布特征,促进土壤盐分分布“高盐异质性-低盐均质性”的转变。

2.2 暗管淋排对土壤盐分的均质化作用分析

对雨季降水淋洗与暗管排水前后的两次土壤含盐量数据的统计分析结果(表 1)表明,雨淋管排具有土壤盐分均质化作用,本节从雨季淋排前后土壤含盐量、土壤脱盐量、土壤脱盐率及淋排前后不同盐渍化等级土壤含盐量变化等方面对雨淋管排均质化过程及特点进行分析。

本文中分析淋排对土壤脱盐的均质化作用时,定义脱盐量=雨季前土壤含盐量-雨季土壤含盐量;脱盐率=(雨季前土壤含盐量-雨季土壤含盐量)/雨季前土壤含盐量 $\times 100\%$,土壤含盐量单位为 g/kg;

分析淋排作用对盐渍化等级的影响时,定义某一盐渍化类型区盐分总量(表 3):

$$SS_i = AS_i \times A_i \times h \times W_u$$

式中: SS_i 为 i 类型区盐分总量(t); AS_i 为 i 类型区平均含盐量(g/kg); A_i 为 i 类型区面积(hm²); h 为土壤深度(m),在此为 0.25 m; W_u 为土壤体积质量(g/cm³),在此取 1.42 g/cm³; $i = 1, 2, 3, 4, 5$, 分别代表非盐渍化区、轻度盐渍化区、中度盐渍化区、重度盐渍化区及盐土

定义淋排后某一类型区脱盐量(表 3):

$$DS_i = SS_{ib} - SS_{ia}$$

式中: DS_i 为 i 类型区脱盐量(t); SS_{ib} 为雨季前 i 类型

区盐分总量(t), SS_{ia} 为淋排后 i 类型区盐分总量(t)。

2.2.1 淋排对土壤脱盐的均质化作用 淋排后土壤盐分与淋排前土壤盐分呈显著相关(图 4),相关性函数曲线为一元二次函数,相关系数为 0.732。雨季暗管淋排前土壤含盐量 < 7 g/kg 的土壤,淋排后土壤含盐量降至 1.5 ~ 2.0 g/kg,成为轻度盐渍化土壤(图 4 中虚线框范围内),该范围样点数占到总样点数的 79%,说明大多数样点经过雨季暗管淋排后土壤盐分异质性具有均质化的演变特点。雨季暗管淋排前土壤盐分 > 7 g/kg 地区的样点,淋排后土壤含盐量降至 1.3 ~ 4.5 g/kg,为中度盐渍化土壤,达到了耐盐作物生长的要求,该范围样点数占总数的 21%,说明高含盐量样点经过雨季暗管淋排后土壤盐分异质性具有均质化的趋势,但这种趋势是否经过高强度的淋排会演变成均质化的特征还有待研究。

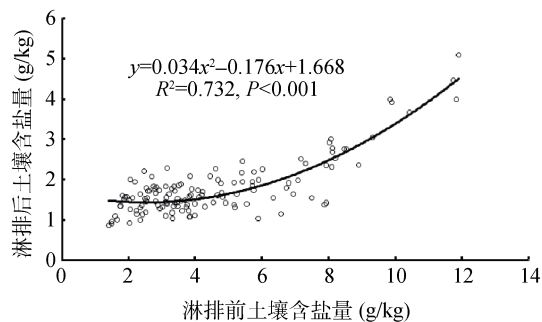


图 4 淋排前与淋排后土壤含盐量相关关系

Fig. 4 Correlation of soil salinity before and after salt leaching

雨季淋排作用下土壤脱盐率随初始含盐量的增加而增加,但受降水类型(降水强度与降水量)与地形的影响,其脱盐率与初始含盐量并非线性相关,而是呈“两头低中间高”的分布形态(图 5),脱盐率最高点约在 7 g/kg 处,淋排前<7 g/kg 的盐分含量区,淋排作用下的脱盐率随初始含盐量的增加而增加,脱盐过程进行到最后,土壤含盐量可控制在 2 g/kg 以下,淋排前土壤含盐量>7 g/kg 的土壤,其脱盐率平缓降低,但仍高于土壤含盐量 4 g/kg 的土壤,因此提高淋排强度也许会增加脱盐率,这也是值得进一步探讨的问题。

2.2.2 淋排作用对不同土壤盐渍化等级的影响 按照王遵亲等^[24]对盐渍化土壤的划分标准,雨季淋排前试验区以中重度盐化土(2 g/kg<含盐量<10 g/kg)为主(表 3),面积超过 85%,表层土壤盐分总含量高达 109.78 t,经过雨季降水淋洗与暗管排水排盐,试

验区主要土壤类型降为轻度盐化土(1 g/kg<含盐量<2 g/kg),面积超过全区 70%,淋排后的土壤盐分总含量为 42.00 t。经过雨季淋排,试验区总脱盐量达到 67.78 t,其中重度盐渍化区对脱盐量的贡献最大,为 91.04%,由于淋排后土壤盐分降低,轻度盐渍化区面积增加,其对脱盐量的贡献为 -35.01%。

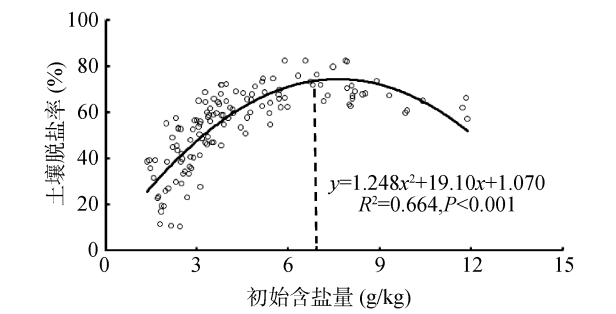


图 5 脱盐率与初始含盐量关系
Fig. 5 Changes of desalinization ratio along with the initial salinity

表 3 不同等级盐渍化区盐分淋洗前后平均含盐量、面积及脱盐量分布表
Table 3 Distributions of salinity, areas and desalination in different level saline regions before and after leaching

项目		取样时间	非盐化土	轻度盐化土	中度盐化土	重度盐化土	盐土	总和
平均含盐量 (g/kg)		雨季前	0.00	1.72	3.05	6.73	11.52	
		雨季后	0.93	1.52	2.68	4.78	0.00	
面积	面积 (hm ²)	雨季前	0.00	0.60	3.24	2.64	0.2	6.68
		雨季后	0.20	5.08	1.32	0.08	0.00	6.68
	面积比例 (%)	雨季前	0.00	8.98	48.50	39.52	2.99	
		雨季后	2.99	76.05	19.76	1.20	0.00	
盐分总量	盐分总量 (t)	雨季前	0.00	3.67	34.86	63.07	8.18	109.78
		雨季后	0.66	27.40	12.58	1.36	0.00	42.00
	盐分总量比例 (%)	雨季前	0.00	3.34	31.75	57.45	7.45	
		雨季后	1.57	65.24	29.95	3.24	0.00	
脱盐量	脱盐量 (t)	雨季前	-0.66	-23.73	22.28	61.71	8.18	67.78
	脱盐量比例 (%)	雨季后	-0.97	-35.01	32.87	91.04	12.07	

脱盐量与脱盐率的分析结果说明了雨淋管排前后土壤从高盐异质性到低盐均质性的转变趋势,不同等级盐渍化区土壤盐分含量与面积变化的分析结果对土壤从高盐异质性到低盐均质性过程中各部分的贡献大小进行了定量化,可更精确掌握雨淋管排模式下农田尺度的土壤盐分变化。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 旱季土壤盐分异质性影响因素对研究结果的影响 本文的研究结果明确了在高水位盐碱地雨季暗管淋排作用下土壤盐分空间分布的高异质性具有均质化的作用或趋势,该结果对于盐碱地的治理具有非常有利和积极的意义。

但是试验区旱季(非雨季)由于降水少、高水位引起的地下水顶托、土壤蒸发量大等因素共同作用,使土壤盐分极易到达表层土壤形成累积,这种累积持续至雨季前达最高值,因此旱季的返盐过程会极大地抵消雨季暗管淋排对土壤盐分的均质化效应,换言之,雨季淋排均质化效应的维持和保障必须考虑旱季土壤盐分异质性的影响因素。

土壤盐分空间异质性是由土壤物理性状的内在异质性和外部因素的时空变异性引起的^[25],农田尺度采样可以忽略土壤内在因素的影响,因此试验区旱季土壤盐分空间异质性主要受外部因素的影响。参考 Yang 等^[25]的研究结果,试验区旱季对土壤盐分空间异质性的影响主要是土壤含水量和相对高程的耦合作用。

对本试验雨季前取样的土壤含盐量 (Y) 和土壤含水量 (X_1)、相对高程 (X_2) 作线性回归, 得到回归方程: $Y = 0.166 X_1 - 2.542 X_2 + 18.885$ 。

可以看出, 土壤含盐量与土壤含水量呈正相关, 与相对高程呈负相关。平整土地可以有效减少地表积水, 从而减少土壤含水量与含盐量的空间异质性, 因此高精度土地平整也是强化土壤盐分均质化的条件。

3.1.2 高水位盐碱地雨季暗管淋排下土壤盐分均质化作用的强化作用 对图 4 和图 5 的分析结果表明, 雨季暗管淋排对土壤盐分空间异质性的演变存在一个 7 g/kg 的临界点, $<7 \text{ g/kg}$ 的土壤具有明显的均质化作用, $>7 \text{ g/kg}$ 的土壤具有均质化的趋势。马凤娇等^[26]计算得到暗管排水排盐条件下大于 70 mm 的降雨即可起到淋盐排盐效果, 对土壤盐分含量 $>7 \text{ g/kg}$ 的土壤, 可以推断出, 如具备高强度的降雨频次、灌溉或多年的暗管淋排等条件, 暗管淋排对土壤盐分空间异质性的均质化效果会得到强化, 进而为盐碱地的治理和利用提供有利条件, 但这些强化条件的效果还需要进一步得到试验验证。

3.2 结论

高水位盐碱区土壤盐分空间分布存在自然均质化现象。雨季降水淋洗与暗管排水排盐可显著降低土壤含盐量, 弱化土壤含盐量空间异质性, 促进土壤盐分分布“异质性-均质性”转变。雨季前 $<7 \text{ g/kg}$ 的土壤含盐量经淋排可降至 2 g/kg 以下, 在此土壤含盐量范围内, 脱盐量、脱盐率与初始含盐量均为显著正相关, 雨季前 $>7 \text{ g/kg}$ 的土壤含盐量也有所下降, 但受降水类型与地形影响, 脱盐率随初始含盐量平缓降低。

土壤“高盐异质性-低盐均质性”转化过程的定量分析结果显示: 经过雨季降水淋洗与暗管排水排盐, 试验区土壤类型从中重度盐渍化土变为轻度盐渍化土, 其中, 重度盐渍化土对土壤脱盐量的贡献最大, 可达 91% , 轻度盐渍化土因淋排作用面积有所增加, 其脱盐量的贡献为负值 (-35%)。

参考文献:

- [1] Harrington GA, Hendry MJ. Using direct-push EC logging to delineate heterogeneity in a clay-rich aquitard[J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 2006, 26(1): 92-100
- [2] Douaik A, van Meirvenne M, Tóth T. Statistical methods for evaluating soil salinity spatial and temporal variability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5): 1 629-1 635
- [3] Nosetto MD, Acosta AM, Jayawickreme DH, Ballesteros SI, Jackson RB, Jobbágy EG. Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129: 120-129
- [4] Freeze RA. A stochastic-conceptual analysis of rainfall-runoff processes on a hillslope[J]. Water Resources Research, 1980, 16(2): 391-408
- [5] Milly PCD, Eagleson PS. Effects of spatial variability on annual average water balance[J]. Water Resources Research, 1987, 23(11): 2 135-2 143
- [6] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes MDC, Beltrão J. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(1): 1-10
- [7] 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1983: 130-138
- [8] Skaggs RW, Breve MA, Gilliam JW. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1994, 24(1): 1-32
- [9] Hoffman GJ, Durnford DS, Skaggs RW, van Schilfgaarde J. Drainage design for salinity control[J]. Agricultural drainage, 1999: 579-614
- [10] 于淑会, 刘金铜, 刘慧涛, 谭莉梅, 韩立朴, 白璐. 暗管排水性排水技术治理近滨海盐碱地的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 42-46
- [11] 刘永, 王为木, 周祥. 滨海盐土暗管排水降渍脱盐效果研究[J]. 土壤, 2011, 43(6): 1 004-1 008
- [12] Wesström I, Ekbohm G, Linnér H, Messing I. The effects of controlled drainage on subsurface outflow from level agricultural fields[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(8): 1 525-1 538
- [13] Moustafa M, Yomota A. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties[J]. Agricultural Water Management, 1998, 37(1): 1-19
- [14] Cetin M, Ibrikci H, Kirda C, Kaman H, Karnez E, Ryan J, Topcu S, Eren Oztekin M, Dingil M, Sesveren S. Using an electromagnetic sensor combined with geographic information systems to monitor soil salinity in an area of Southern Turkey irrigated with drainage water[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2012, 21(5): 1 133-1 145
- [15] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 吕烨, 付小军. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1 202-1 210
- [16] 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1983: 16-19
- [17] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳, 王有贞, 汤广民. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水力学报, 1999(3): 71-74
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999
- [19] Darwish KM, Kotb MM, Ali R. Mapping soil salinity using collocated cokriging in Bayariya, Oasis, Egypt [A] // Enschede ITC. Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality[C]. The Netherlands, 2007
- [20] Burgess TM, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties[J]. Journal of Soil Science, 1980, 31(2): 333-341
- [21] White JG, Welch RM, Norvell WA. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems[J]. Soil

- Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 185–194
- [22] 李宝富, 熊黑钢, 龙桃, 张建兵. 田块尺度下冻融前后土壤剖面盐分空间变异性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 140–144
- [23] Cambardella CA, Moorman TB, Parkin TB, Karlen DL, Novak JM, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1 501–1 511
- [24] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 130–136
- [25] Yang F, Zhang GX, Yin XR, Liu ZJ. Field-scale spatial variation of saline-sodic soil and its relation with environmental gactors in Western Songnen Plain of China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(2): 374–387
- [26] 马凤娇, 谭莉梅, 刘慧涛, 于淑会, 刘宏娟, 元媛, 刘金铜. 河北滨海盐碱区暗管改碱技术的降雨有效性评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 409–414

Study on Homogenizing Effect to Heterogeneous Soil Salinity in Coastal Plain of Hebei Province

YU Shu-hui^{1,2}, BAI Lu^{1,2}, LIU Hui-tao¹, LIU Jin-tong^{1*}

(1 Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using basic statistics, geo-statistics and GIS methods, soil salinity spatial variability and homogenizing effect to heterogeneous soil salinity under rainfall leaching and subsurface drainage during the rainy season were studied. The main results showed that: 1) Spatial variability in soil salinity could be decreased significantly under rainfall leaching and subsurface drainage during the rainy season. The coefficient of variation (CV) dropped from 48.13% to 28.14%, and nugget effect value ($C_0/(C_0+C)$) decreased from 72.86% to 59.42%; 2) Spatial variability of soil salinity showed a homogenizing tendency. Soil salinity less than 7 g/kg (79% of samples) homogenized to within 1.5 ~ 2 g/kg under rainfall leaching and subsurface drainage during the rainy season, in this extent, the ratio of soil desalination was positively correlated with the initial soil salinity, whereas that more than 7 g/kg was a negative correlation; 3) The homogeneity was also reflected in transformation of salinity grade at different areas. Before rainfall leaching and subsurface drainage, the moderately and heavily saline soil area dominated the pilot field; after rainfall leaching and subsurface drainage, the mildly saline area was dominant. The amount of soil salt discharge was 67.78 t in which heavily saline soil area constituted 91% and mildly contributed 35.01% affected by leaching of rain water and subsurface drainage.

Key words: Soil salinity, Spatial variability, Subsurface drainage, Homogenizing effect, Geostatistical analysis