

DOI: 10.11766/trxb201701160401

黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究*

吕真真¹ 杨劲松^{2†} 刘广明² 李金彪^{2, 3} 刘洪强² 李兵²

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 南京林业大学林学院, 南京 210037)

摘要 为研究黄河三角洲表层土壤盐分含量与地下水特征的关系, 对研究区内土壤盐分含量及地下水进行原位监测, 分析土壤盐渍化和地下水特征, 并运用灰色关联分析法对地下水埋深、电导率、pH和主要离子含量的关系进行定量分析。结果表明: 土壤表层盐分含量均值为 $3.90 \sim 6.31 \text{ g kg}^{-1}$, 表层以下土壤盐分含量均值为 $2.54 \sim 3.44 \text{ g kg}^{-1}$, 属于中度及以上盐渍化程度; 地下水埋深平均值为 $1.16 \sim 1.71 \text{ m}$, 普遍较浅; 地下水阴离子以 Cl^- 为主, 阳离子以 Na^+ 为主, 两者分别占阴、阳离子总量的比例约为65%。关联分析表明, 不同地下水特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度不同, 同一特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度在不同时期差异显著, 总体而言, 土壤表层积盐与地下水电导率、 Na^+ 、 Cl^- 的关系较为密切, 与pH、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 之间的关系较弱。在防治土壤盐渍化中, 应当加强对地下水电导率、 Na^+ 、 Cl^- 的控制与管理。

关键词 黄河三角洲; 土壤盐渍化; 地下水; 灰色关联分析

中图分类号 S156.4 **文献标识码** A

黄河三角洲是由黄河携带大量泥沙在入海口淤积而成的新生陆地, 且每年继续携带大量泥沙入海, 使得黄河三角洲向渤海推进, 为中国最大的河口三角洲且是世界上土地面积自然增长最快的地区之一, 是我国非常重要的后备土地资源^[1]。黄河三角洲受河流和海洋等多种动力作用, 致使该地区地下水埋深较浅, 矿化度较高, 土壤质地以粉砂和细砂为主, 毛管水作用强烈, 地下水盐分易集聚地表, 土壤盐渍化普遍存在, 土壤盐渍化已成为当地生态系统和农业可持续发展最重要的环境问题^[2]。

众多学者对不同地区土壤盐分与地下水的关系曾进行了相关研究, 研究方法有通过模型模拟法模

拟地下水动态对土壤盐分运移的影响^[3-5]; 建立经验模型定量分析地下水埋深及矿化度与土壤盐分含量的关系^[6-8]; 对比地下水埋深、矿化度与土壤盐分含量在空间上的分布特征, 分析地下水对土壤盐渍化的相应关系^[9-12]; 分析土壤盐渍化驱动因素以探讨地下水对土壤盐渍化的影响^[2, 13-14]; 通过模拟实验设置不同地下水条件, 研究地下水对土壤盐渍化影响^[15-16]。目前关于地下水对土壤盐分的影响研究主要集中于地下水埋深和矿化度与土壤盐分的关系, 且主要是针对某一个时期, 而对于多个时期地下水埋深及其化学特征共同作用下对土壤盐渍化影响需进一步研究。黄河三角洲地下水季节性

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303, 2016YFC0501309)、中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-SW-ST5-141-2)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1005)资助 Supported by the National Key R & D Projects of China (Nos. 2016YFD0200303, 2016YFC0501309), the Science and Technology Service Network (STS) Project of the Chinese Academy of Science and Technology (No. KFJ-SW-ST5-141-2), the Jiangsu Provincial Agricultural Science and Technology Innovation Fund Project (No. CX(15)1005)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

作者简介: 吕真真(1987—), 女, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤盐渍化防控管理与盐渍土资源利用方面的研究。E-mail: lvzhenzhen808@163.com

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-05-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-06-27

动态变化较为剧烈^[17]，且土壤盐渍化季节变化特征显著^[2]，而地下水特征对土壤盐渍化的影响程度是否具有季节变化特征，此方面的研究鲜有报道。

本研究采用土壤盐分和地下水原位定点观测数据，应用灰色关联分析法，定量分析不同时期土壤盐分与地下水特征的关系，以期为黄河三角洲水土资源可持续合理利用和土壤盐渍化有效防治提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄河三角洲，依据县界划定距海岸线约50 km盐碱土广泛分布的区域为研究区（东经118°10′~119°17′和北纬37°09′~38°09′），包括河口区、垦利县及东营区全部，利津县东北部和广饶县北部（图1）。该区属于北温带半湿润季风型气候，季风盛行。平均气温在11.7~12.6℃，最高气温多出现在6—7月份，低温出现在1—2月份。年均降水量为530~630 mm，降水较集中，主要在7—8月份，占全年降水量的70%^[18]，蒸发量远大于降雨量，年蒸降比约为3.5:1。土壤类型主要有潮土，盐化潮土和滨海盐潮土。河积粉砂和潮汐沉积物是地下水的赋存介质。沉积物以粉砂、细砂、黏土、亚黏土为主，沿海地带常见有海相贝壳。上部存在巨厚的咸水体，咸水底界面埋深由小清河沿

岸100 m过渡到东北沿海大于400 m。浅层地下水矿化度大于5 g L⁻¹，为咸水区。研究区域地势沿黄河走向自西南向东北倾斜，黄河河床不断淤高，从黄河到海岸地表高程缓慢下降，黄河以北三角洲向北和东北方向倾斜，黄河以南三角洲向东南方向倾斜。地下水流向与地表高程变化方向一致，黄河成为天然的地下水分水岭，以现行黄河河道和刁口流路为界，分为北、东北、东南三股主流方向向海排泄。

1.2 试验设计

为获取土壤盐分含量和地下水特征等资料，综合考虑水文地质、盐渍化现状、地势、土地利用与人类活动等因素，在研究区域内布设4条监测断面，共20眼地下水位、水质监测井（图1），并于2013年2月、5月、8月和11月进行地下水埋深测量并采集地下水样品及相应位置处土壤样品，采集深度分别为0~15 cm、15~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm样品。采集的土壤样品带回实验室内自然风干、磨碎、过2 mm筛后备用。所有土壤样品均制备1:5土水质量比浸提液，参照《土壤农业化学分析方法》^[19]测定土壤及地下水Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻含量和地下水EC、pH，离子加和法计算土壤盐分含量。

1.3 灰色关联分析方法

灰色关联度分析的基本思想是根据序列曲线几

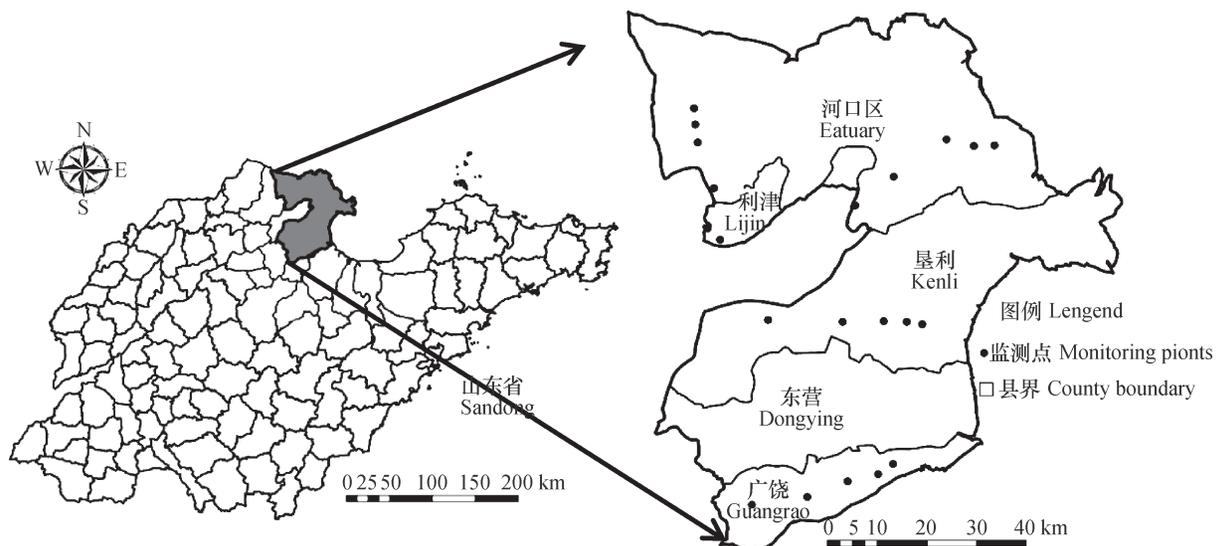


图1 研究区域及监测点位置图

Fig. 1 Location map of the study area and monitoring sites

何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。计算步骤如下:

(1) 灰色绝对关联度:

设反映系统行为特征的参考序列为 $X_0 = [X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)]$, 影响系统行为的比较序列为 $X_i = [X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)]$, ($i=1, 2, \dots, m$), 求序列 X_0 和 X_i 的始点零化像 X_i^0 , 公式为: $X_i^0 = (x_i(1) - x_i(1), x_i(2) - x_i(1), \dots, x_i(n) - x_i(1)) = (x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n))$

求 $|S_0|, |S_i|, |S_i - S_0|$, 计算公式为:

$$|S_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_0^0(k) + \frac{1}{2} x_0^0(n) \right| \quad (1)$$

$$|S_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2} x_i^0(n) \right| \quad (2)$$

$$|S_i - S_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2} (x_i^0(n) - x_0^0(n)) \right| \quad (3)$$

最后求 X_0 和 X_i 的绝对关联度 ε_{0i} , ($i=1, 2, \dots, m$) 公式为:

$$\varepsilon_{0i} = \frac{1 + |S_0| + |S_i|}{1 + |S_0| + |S_i| + |S_i - S_0|} \quad (4)$$

(2) 灰色相对关联度:

首先求 X_0 和 X_i 的初值像 (每个序列各分量分别除以其对应的第一分量) X'_0 和 X'_i

$$X'_i = \frac{X_i}{x_i(1)} = \left\{ \frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(n)}{x_i(1)} \right\} \quad (5)$$

然后对 X'_i 进行初值零化像 $X_i'^0$, 计算 $|S'_0|, |S'_i|, |S'_i - S'_0|$, 最后计算 X_0 与 X_i 相对关联度, 记为 r_{0i}

$$r_{0i} = \frac{1 + |S'_0| + |S'_i|}{1 + |S'_0| + |S'_i| + |S'_i - S'_0|} \quad (6)$$

(3) 灰色综合关联度:

在计算出绝对关联度和相对关联度的基础上, 可计算得出 X_0 与 X_i 的灰色综合关联度, 记为 ρ_{0i} :

$$\rho_{0i} = \theta \varepsilon_{0i} + (1 - \theta) r_{0i} \quad \theta \in [0, 1] \quad (7)$$

1.4 数据分析方法

采用 SPSS19.0 软件进行土壤盐分含量和地下水特征的统计分析, 采用 Excel 进行数据标准化处理, 灰色综合关联度的计算采用 GM 软件。

2 结果与讨论

2.1 不同深度土层土壤盐渍化特征

对不同时段下不同深度土层土壤盐分含量进行描述性分析 (表1)。研究区2月、5月、8月和11月表层 (0~15 cm) 土壤盐分含量均值在 3.90~6.31 g kg⁻¹, 按照滨海盐碱化分级标准^[20], 平均处于中、重度盐渍化土及盐土程度, 其中5月份最高, 2月份次之, 8月和11月份相对较小; 表层以下土层土壤盐分含量均值均大于 2 g kg⁻¹, 属于中度及以上程度盐渍化。各月份表层土壤盐分含量平均值均高于其他土层, 研究区土壤盐分呈现表聚特征, 以2月和5月份尤为突出。不同土层深度土壤盐分含量的变异程度不同, 表层 (0~15 cm) 变异最大, 随土层深度的加深, 变异系数 CV 值呈现下降趋势, 说明了水平方向上土壤盐分含量的变异随深度的增加而逐渐变弱; 4个月份 0~15 cm 土层均属于强变异程度。

对不同土层土壤盐分含量进行非参数相关分析, 分析结果见表2。不同土层土壤盐分含量间存在极显著相关性, 说明各土层土壤盐分含量密切相关, 可能与他们具有相同的母质有关。表层 (0~15 cm) 与亚表层 (15~40 cm) 的相关性最高, 底层 (80~100 cm) 次之。15~40 cm 和 40~60 cm 两个土层, 随土层深度加深, 相邻两个土层土壤盐分含量之间的相关性最大, 随土层间隔的增大而减小。

2.2 不同时段地下水特征

对不同时段地下水各指标进行描述性统计分析 (表3)。由表3可见, 地下水电导率极差为 0.98~42.3 mS cm⁻¹, 波动范围较大, 变异系数在 81.9%~97.9%, 属于中等变异性。地下水 pH 在 6.72~8.32 范围, 属于中性至弱碱性, 变异系数均小于 0.10, 呈现弱变异性, 研究区内地下水酸碱度相对稳定。由各时间段地下水埋深平均值可知, 研究区地下水埋深普遍较浅, 平均值变化范围为 1.16~1.71 m, 以8月份最浅, 地下水埋深均呈现中等变异性。

地下水阳离子中, Na⁺ 平均浓度最高, 平均在

表1 不同深度土层土壤盐分含量统计分析

Table 1 Statistics of soil salt content relative to soil depth

时间 Time	土层 Soil layer (cm)	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)
2月 February	0~15	0.29	24.28	5.77	7.40	128.4
	15~40	0.16	13.62	2.93	3.09	105.4
	40~60	0.14	11.32	2.89	2.80	96.9
	60~80	0.15	9.38	2.81	2.45	87.0
	80~100	0.15	9.26	2.93	2.47	84.2
5月 May	0~15	0.29	28.4	6.31	8.01	126.9
	15~40	0.18	9.23	3.21	3.01	93.8
	40~60	0.18	9.43	2.99	2.86	95.8
	60~80	0.18	9.28	2.75	2.55	92.8
	80~100	0.17	8.75	3.02	2.57	85.1
8月 August	0~15	0.26	29.97	4.06	6.87	169.1
	15~40	0.19	13.62	2.55	3.20	125.5
	40~60	0.18	11.32	2.61	2.66	101.7
	60~80	0.15	9.24	2.54	2.27	89.3
	80~100	0.15	9.26	2.62	2.38	91.1
11月 November	0~15	0.27	17.36	3.90	4.91	125.9
	15~40	0.17	9.43	3.44	3.19	92.6
	40~60	0.14	9.13	3.23	3.00	92.8
	60~80	0.17	9.38	3.31	2.83	85.5
	80~100	0.19	9.10	3.44	2.90	84.4

表2 不同深度土层土壤盐分含量间的相关性

Table 2 Correlation of soil salt contents in different soil layers ($n=80$)

	0~15 cm	15~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
0~15 cm	1				
15~40 cm	0.847**	1			
40~60 cm	0.746**	0.947**	1		
60~80 cm	0.740**	0.915**	0.973**	1	
80~100 cm	0.815**	0.911**	0.931**	0.946**	1

1 687 ~ 3 015 mg L⁻¹, 约占阳离子总量比例为65%, 11月份地下水Na⁺浓度最高, 5月份最低, 除5月呈现强变异性以外, 其他时间段均呈现中等变异性; K⁺的变异系数均大于1.00, 呈现强变异性, Ca²⁺和Mg²⁺属于中等变异程度, 二者变异性随时间变化规律相同, 但Mg²⁺较Ca²⁺变异性强。地下水阴离子以

Cl⁻为主, 占阴离子总量的比例约为65%, 其次为SO₄²⁻, 约占阴离子总量的15%, CO₃²⁻浓度最低, 大部分地下水样品均未能监测出; Cl⁻变异系数为0.95 ~ 1.19, 除2月呈现中等变异性以外, 其他时间段均呈现强变异性, HCO₃⁻和SO₄²⁻的变异系数分别为0.22 ~ 0.48和0.57 ~ 0.93, 均呈现中等变异

表3 地下水特征描述性统计

时间 Time	统计量 Statistics	电导率 EC (mS cm ⁻¹)	pH	主要离子含量 Content of main ions (mg L ⁻¹)						地下水埋深 Groundwater tables (m)		
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
2月 February	最小值Min	1.71	6.92	0.0	44.3	2.09	171.3	0.00	301.4	205.7	162.9	0.87
	最大值Max	42.3	7.94	838.7	1 230	523.3	9 345	44.4	857.9	14 200	2 165	2.92
	均值Mean	14.2	7.37	386.6	452.9	80.7	2 706	4.23	619.8	4 470	868.2	1.71
	标准差SD	11.6	0.26	259.2	358.1	123.6	2 483	13.4	138.7	4 250	496.0	0.51
5月 May	变异系数CV (%)	81.9	3.57	67.0	79.1	153.1	91.8	315.8	22.4	95.0	57.1	30.11
	最小值Min	1.31	6.72	51.8	40.5	2.71	159.2	0.00	152.4	195.8	189.1	0.51
8月 August	最大值Max	35.5	8.32	1 113	1 277	323.4	7 025	77.7	833.1	12 400	2 197	2.73
	均值Mean	11.8	7.58	409.1	383.6	58.4	2 017	14.5	445.4	3 480	803.7	1.47
	标准差SD	9.97	0.46	329.2	342.5	87.2	1 842	25.0	213.6	3 600	534.4	0.56
	变异系数CV (%)	84.4	6.10	80.5	89.3	149.3	91.3	172.7	48.0	103.5	66.5	37.97
11月 November	最小值Min	0.98	6.77	68.5	63.8	3.58	50.7	0.00	208.8	72.5	111.9	0.27
	最大值Max	36.5	7.71	1 047	1 302	1 030	7 007	66.6	1 270	12 700	2 991	2.13
	均值Mean	11.1	7.18	388.8	362.0	100.5	1 687	15.6	514.6	3 300	851.8	1.16
	标准差SD	10.9	0.25	345.1	365.6	225.0	1 961	19.0	223.8	3 910	796.1	0.42
变异系数CV (%)	变异系数CV (%)	97.9	3.52	88.8	101.0	223.9	116.2	122.1	43.5	118.6	93.5	35.94
	最小值Min	2.16	6.79	37.3	63.1	2.42	294.4	0.00	301.4	201.8	71.4	0.75
	最大值Max	38.0	7.98	1 193	1 366	588.0	9 113	44.4	857.9	13 800	2 714	2.64
	均值Mean	13.3	7.29	445.5	419.8	77.2	3 015	4.44	622.4	4 200	1 130	1.59
标准差SD	标准差SD	11.2	0.35	345.2	374.3	125.2	2 665	13.7	141.8	4 300	803.2	0.42
	变异系数CV (%)	84.0	4.78	77.5	89.2	162.2	88.4	307.8	22.8	102.3	71.1	26.53

性, SO_4^{2-} 较 HCO_3^- 变异性强。

2.3 土壤表层盐分含量与地下水特征综合关联度变化

由于地理现象与问题的复杂性, 以及人们认识水平的限制, 许多因素之间的关系是灰色的, 很难分清哪些因素是主导因素和非主导因素, 相关系数在比较精确地度量其相关程度的客观大小方面存在局限性, 而灰色关联分析, 为解决这类问题提供了一种行之有效的办法。

本文选择各时间段监测的地下水埋深、电导率、pH、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度11个指标为比较序列, 土壤表层盐分含量为参考序列进行灰色关联分析, 分析地下水各因素对土壤表层盐分含量的影响程度。由于系统中各因素的量纲不相同, 在进行关联分析之前需对原始数据进行消除量纲处理, 转换为可比较的数

据, 本文采用标准化变换的方法, 即原始数据减平均值后除标准差, 获得标准化序列。

“盐随水来, 盐随水去”, 在蒸发强烈的条件下, 地下水中的盐分随毛管水上升至地表, 水分蒸发后盐分滞留在土壤中, 因此地下水特征显著影响土壤表层土壤盐分含量。不同时期土壤表层盐分含量与各地下水特征的关联情况见表4。2月, 土壤表层盐分含量与地下水特征指标的综合关联度排序为: 地下水埋深 > K^+ > Na^+ > Cl^- > EC > Mg^{2+} > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > HCO_3^- > pH > CO_3^{2-} ; 5月排序为: Na^+ > EC > 地下水埋深 > Mg^{2+} > Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > K^+ > Ca^{2+} > pH > CO_3^{2-} ; 8月排序为: Na^+ > K^+ > SO_4^{2-} > Cl^- > Ca^{2+} > Mg^{2+} > EC > pH > 地下水埋深 > CO_3^{2-} > HCO_3^- ; 11月排序为: Na^+ > Cl^- > Mg^{2+} > EC > K^+ > 地下水埋深 > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > HCO_3^- > pH > CO_3^{2-} 。

表4 不同时段土壤表层盐分含量与地下水特征间的综合关联度

Table 4 Temporal variation of comprehensive correlativity between surface soil salt content and groundwater characteristics

时间 Time	电导率 EC	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	地下水埋深 Groundwater tables
2月 February	0.832	0.883	0.774	0.879	0.805	0.955	0.859	0.902	0.791	0.838	0.955
5月 May	0.896	0.930	0.784	0.936	0.904	0.901	0.930	0.944	0.829	0.926	0.934
8月 August	0.916	0.917	0.813	0.908	0.778	0.925	0.915	0.932	0.840	0.922	0.817
11月 November	0.865	0.913	0.771	0.898	0.818	0.894	0.905	0.922	0.804	0.887	0.889

详细分析土壤表层盐分含量与地下水埋深、电导率、pH、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的综合关联度可见, 各地下水特征指标在同一时期综合关联度不同, 且同一特征指标在不同时期也有较大变化, 说明各地下水特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度不同, 同一特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度随时间推移而变化。如地下水埋深在2月的综合关联度最大, 5月第4, 至8月则排位倒数第3位, 11月排位第6, 由此可知, 地下水埋深与土壤表层盐分含量的关系密切程度在2月和5月较8月和11月高, 分析原因可能为, 地下水埋深的主要影响因素包括大气降水、蒸发、地表水体补充、人类开采利用等, 是土壤发生盐渍化的一个决定性条件, 2月至5月期间, 降水较少而蒸发量较大, 地表水分蒸发强烈, 地下水中的盐分随毛管水上升, 能否积聚在土壤表层, 地下水埋深

是决定性因素, 故突显了地下水埋深对表层土壤盐分含量的影响程度, 而8月是降水较集中的时期, 地下水得到补充, 地下水埋深普遍较浅, 受降雨影响表层土壤盐分被淋洗, 致使土壤表层盐分含量与地下水埋深的关系被弱化; 地下水电导率与土壤表层盐分含量的综合关联度在5月份最高, 关联度为0.94, 原因可能是地下水电导率表征地下水盐分含量, 在地下水埋深相同的情况下, 地下水盐分含量越高, 地下水向土壤中补给的盐分越多, 土壤积盐越重, 而5月份是春灌后, 黄河三角洲入海口地区, 地下水埋深普遍较浅, 地下径流不畅, 在大水漫灌后地下水位抬升, 加之蒸发强烈, 地下水中的盐分随毛管水上升更易积聚地表, 故地下水电导率高低显著影响土壤表层盐分含量。

地下水阴离子中, Cl^- 与土壤盐分含量的关系密切程度最高, 其次为 SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 与土壤

盐分含量的关系较弱; 地下水阳离子中 K^+ 和 Na^+ 对土壤盐分含量的贡献一般较 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 大, 造成地下水各离子含量与表层土壤盐分含量关联度不同的原因可能为, 盐分在土体中上下运动以氯化物最为活跃, 硫酸盐次之, 碳酸盐较稳定, 且在黄河入海流路变迁和海水入侵两大关键因素的驱动下, 通过混合、蒸发浓缩、溶滤、阳离子交替吸附作用及人类干扰长期作用下, 该地区地下水化学成分以 Cl^- 和 Na^+ 为主控离子^[21], 故 Cl^- 和 Na^+ 与土壤表层盐分含量的相关性较强; pH的关联度排序较为靠后, 说明与土壤表层盐分含量的关系密切程度较弱, 因研究区地下水pH随时间推移较为稳定, 且空间变异性弱, 对表层土壤盐分含量未构成影响。总体而言, 土壤表层盐分含量与EC、 Na^+ 、 Cl^- 关系较为密切, 与pH、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 之间的关系较弱, 由此可见, 在防治土壤盐渍化中, 应当加强对地下水电导率、 Na^+ 、 Cl^- 的控制与管理, 加强管理并采取措施防止海水侵染进一步加剧。

3 结 论

研究区土壤盐渍化现象较为严重, 盐分表聚现象显著, 1 m土体平均处于中度及以上盐渍化程度; 地下水埋深普遍较浅, 且5月和8月浅于2月和11月; 地下水阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 Cl^- 为主; 各地下水特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度不同, 同一特征指标与土壤表层盐分含量的密切程度随时间推移而变化, 总体而言, 地下水电导率、 Na^+ 、 Cl^- 及显著影响土壤表层盐分积聚, pH、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 对土壤表层积盐的影响程度相对较小。

参 考 文 献

- [1] 许学工. 黄河三角洲地域结构、综合开发与可持续发展. 北京: 海洋出版社, 1998
- Xu X G. Regional structure, comprehensive exploitation and sustainable development of the Yellow River Delta (In Chinese). Beijing: Ocean Press, 1998
- [2] 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. 水土保持学报, 2010, 24 (1): 139—144
- Fan X M, Liu G H, Tang Z P, et al. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (1): 139—144
- [3] 徐力刚, 杨劲松, 张奇. 冬小麦种植条件下土壤水盐运移特征的数值模拟与预报. 土壤学报, 2005, 42 (6): 923—929
- Xu L G, Yang J S, Zhang Q. Numerical simulation and forecasting of soil water and salt regime under winter wheat crop plantation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (6): 923—929
- [4] Xie T, Liu X, Sun T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China. Ecological Modelling, 2011, 222 (2): 241—252
- [5] Xu X, Huang G H, Sun C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. Agricultural Water Management, 2013, 125 (7): 46—60
- [6] 孙建, 乔英, 朱珠, 等. 地下水动态及与土壤盐渍化的关系——以新疆兵团二二四团场为例. 湖北农业科学, 2012, 51 (9): 1763—1766, 1780
- Sun J, Qiao Y, Zhu Z, et al. The groundwater dynamic changes and its effect on secondary salinization of soil —A case of regiment 224 in Xinjiang production and construction corps (In Chinese). Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51 (9): 1763—1766, 1780
- [7] 李彬, 史海滨, 闫建文, 等. 节水改造后盐渍化灌区区域地下水埋深与土壤水盐的关系. 水土保持学报, 2014, 28 (1): 117—122
- Li B, Shi H B, Yan J W, et al. Relation between groundwater depth and soil water and salt after water saving reform in salinization irrigation district (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (1): 117—122
- [8] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 等. 新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系. 土壤学报, 2014, 51 (1): 75—81
- Chen Y B, Hu S J, Luo Y, et al. Relationship between salt accumulation in topsoil of deserted land and groundwater in areas with shallow groundwater table in Kashi, Xinjiang (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (1): 75—81
- [9] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 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. 生态学报, 2012, 32 (4): 1202—1210
- Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (4): 1202—1210

- [10] Fan X, Pedroli B, Liu G, et al. Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation & Development*, 2012, 23 (2): 175—189
- [11] 邓宝山, 瓦哈甫·哈力克, 党建华, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析. *干旱区地理*, 2015, 38 (3): 599—607
Deng B S, Wahap H, Dang J H, et al. Coupled analysis of spatio-temporal variability of groundwater depth and soil salinity in Keriya Oasis (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2015, 38 (3): 599—607
- [12] 努尔麦麦提江·吾布力卡斯穆, 塔西甫拉提·特依拜, 阿不都拉·阿不力孜, 等. 克里雅绿洲地下水埋深时空变化对土壤盐分分布的影响. *节水灌溉*, 2016 (5): 23—27, 32
Nurmamatjan O, Tashpolat T, Abdulla A, et al. The effects of spatial and temporal distribution of groundwater on the soil salinity in Keriya Oasis in Xinjinag (In Chinese). *Water Saving Irrigation*, 2016 (5): 23—27, 32
- [13] 刘衍君, 曹建荣, 高岩, 等. 莱州湾南岸海水入侵区土壤盐渍化驱动力分析与生态对策. *中国农学通报*, 2012, 28 (2): 209—213
Liu Y J, Cao J R, Gao Y, et al. The driving factors and ecological countermeasures of soil salinization in the seawater intrusion areas in the south of Laizhou Bay (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (2): 209—213
- [14] 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. *海洋科学进展*, 2014, 32 (4): 508—516
Cao J R, Xu X Y, Yu H J, et al. Analysis for driving forces and ecological risk assessment of soil salinization in the Yellow River Delta (In Chinese). *Advances in Marine Science*, 2014, 32 (4): 508—516
- [15] 夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 等. 不同潜水埋深下土壤盐运移特征及其交互效应. *农业工程学报*, 2015, 31 (15): 93—100
Xia J B, Zhao X M, Zhao Z G, et al. Migration characteristics of soil water and salt and their interaction under different groundwater levels (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (15): 93—100
- [16] Qureshi A S, Ahmad W, Ahmad A. Optimum groundwater table depth and irrigation schedules for controlling soil salinity in central Iraq. *Irrigation and Drainage*, 2013, 62 (4): 414—424
- [17] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 等. 黄河三角洲典型区域地下水动态分析. *地理科学进展*, 2008, 27 (5): 49—56
Li S N, Wang G X, Deng W, et al. Variations of groundwater depth in Yellow River Delta in recent two decades (In Chinese). *Progress in Geography*, 2008, 27 (5): 49—56
- [18] 赵延茂, 宋朝枢. 黄河三角洲自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 1995
Zhao Y M, Song C S. Scientific survey of the Yellow River delta national nature reserve (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1995
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [20] 朱庭芸, 何守成. 滨海盐渍土的改良和利用. 北京: 中国农业出版社, 1985
Zhu T Y, He S C. Improvement and utilization of coastal saline soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1985
- [21] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用. *环境科学*, 2012, 33 (2): 370—378
An L S, Zhao Q S, Ye S Y, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow River Delta (In Chinese). *Environment Science*, 2012, 33 (2): 370—378

Relationship between Soil Salinization and Groundwater Characteristics in the Yellow River Delta

LÜ Zhenzhen¹ YANG Jingsong^{2†} LIU Guangming² LI Jinbiao^{2, 3} LIU Hongqiang² LI Bing²

(¹ Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

(² State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(³ College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract 【Objective】 Soil salinization is one of the most important environmental problems that restrict the ecological system and the sustainable development of agriculture in the Yellow River delta. Composed mainly of silt and fine sand the soil is stronger in capillary water action, turning groundwater into the main factor affecting migration, accumulation and release of salt in soil body. To study relationships between soil salinity and groundwater will sure be of important theoretical value and practical significance to amelioration of the saline alkali soil and control of secondary salinization of the soil in the Yellow River Delta. 【Method】 In order to study the relationship between salt accumulation in topsoil and groundwater characteristics and to monitor in-situ variation of soil salt content and groundwater table in the Yellow River Delta, four sections were laid out and a total of 20 wells set up by taking into full consideration factors like hydrogeological features, soil salinization status, topography, land use and human activities. Groundwater tables in the wells were measured, and water samples from the wells and topsoil (0 ~ 15 cm) samples in the locations of the wells were collected in February, May, August and November, 2013 for analysis of salt content and characteristics of the groundwater. Groundwater tables were measured, and samples of the groundwater and topsoil (0 ~ 15 cm) were collected from the wells and the fields near the wells, separately, in February, May, August, and November 2013, for analysis of soil salt content and characteristics of the groundwater. Grey correlation analysis of the obtained data was performed to quantitatively analyze relationships of groundwater table with EC, pH, and ion content (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-}) of the water relative to season. 【Result】 Results show that soil salt varied in the range of 3.90 ~ 6.31 g kg^{-1} in content, in the topsoils and of 2.54 ~ 3.44 g kg^{-1} in the subsoil both belonging to the category of medium or higher in salinization degree; Groundwater tables were all rather high, fluctuating in the range of 1.16 ~ 1.71 m; and the anion in the groundwater was dominated with Cl^- , while the cation with Na^+ , accounting in total for 65% of the total of ions. Correlation analysis shows that the relationships of the groundwater characteristics with salt content in the topsoil varied from index characteristics and with time as well. On the whole, salt accumulation in the surface soil was closely related to EC, Na^+ and Cl^- in the groundwater, but not so to pH, CO_3^{2-} and HCO_3^- . 【Conclusion】 To control and manage soil salinization in the Yellow River Delta, it is essential to intensify control of EC, Na^+ and Cl^- in the groundwater of the region.

Key words Yellow River Delta; Soil salinization; Groundwater; Grey correlation analysis

(责任编辑：卢萍)