

干旱区农田灌溉前后土壤水盐时空变异性研究*

李宝富^{1,2} 熊黑钢^{3**} 张建兵⁴ 龙桃⁵

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院研究生院 北京 100049; 3. 北京联合大学应用文理学院 北京 100083;
4. 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 5. 新疆大学资源与环境科学学院 乌鲁木齐 830046)

摘 要 通过田间土壤剖面取样,测定了新疆奇台县干旱区农田灌溉前、灌溉后 1 周和 3 周土壤水盐的时空变异特征。结果表明:灌溉前,剖面各层土壤含水量较低(15.25%~16.70%),且呈中等(偏弱)变异性;剖面上部(40 cm 以上)土壤盐分呈强变异性,而下部为中等(偏强)变异性。灌溉后 1 周,除 0~20 cm(弱变异性)外,其他土层水分及剖面下部盐分变异性未变,但变异系数均减小,上部土壤盐分转为中等(偏强)变异性;剖面平均土壤含水量升高 10.51%,脱盐率达 8.94%,其中,表层(0~20 cm)土壤水分增加率(118.48%)及脱盐率(20.86%)最大,底层(100~120 cm)水分增加率(40.54%)及脱盐率(-6.93%)最小。灌溉后 3 周与 1 周相比,各层(除 80~100 cm 土层)水分及盐分的变异性保持不变,但水分的变异系数增大,而盐分的变异系数减小;剖面平均含水量减少 5.20%,表层(0~20 cm)失水率(36.47%)最大,80~100 cm 失水率(7.31%)最小;表层土壤积盐率(4.55%)约为 20~40 cm 土层的 12 倍;而 40 cm 土层以下仍处于脱盐阶段,40~80 cm 土壤脱盐率减小,80~120 cm 土层脱盐率(9.03%)增大。

关键词 干旱区农田 灌溉 土壤剖面 水盐含量 时空变异 失水率 积盐率 脱盐率

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)03-0491-09

Spatial and temporal variations in soil water and salt in arid areas before and after irrigation

LI Bao-Fu^{1,2}, XIONG Hei-Gang³, ZHANG Jian-Bing⁴, LONG Tao⁵

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Arts & Science of Beijing Union University, Beijing 100083, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract Spatial and temporal variations in soil water and salt contents of arid farmlands in Qitai County, Xinjiang was investigated before and one week, 3 weeks after irrigation through profiles sampling. The results showed low soil water contents (15.25%~16.70%) in all soil layers before irrigation, with moderate to weak spatial variability. Salt content in the upper 40 cm soil layer was strongly variable, while that in the lower soil layer was moderately variable. One week after irrigation, soil water and salt contents in the soil layers (except for the 0~20 cm soil layer with weak variability) remained unchanged, but their coefficients of variation dropped. Salt content variability in the upper soil layer changed to medium and strong. Average water content in the profiles increased by 10.51%, with a desalting rate of 8.94%. The rates of water increase (118.48%) and desalting (20.86%) in the 0~20 cm soil profile were the highest. On the other hand, the rates of water increase (40.54%) and desalting (-6.93%) were lowest in the 100~120 cm soil layer. Compared with the one week post-irrigation condition, variation in water and salt contents in the soil layers (except for the 80~100 cm soil layer) remained unchanged three week after irrigation. However, the coefficient of variation for water content increased while that for salt decreased. Average water content along the soil profile decreased by 5.20%. The rate of water

* 国家自然科学基金项目(40771194)、北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR200906125)和国家科技支撑计划项目(2006BAC01A03, 2006BAD26B0901)资助

** 通讯作者: 熊黑钢(1956~), 男, 博士, 教授, 现主要从事干旱区资源与环境研究。E-mail: xhg1956@sohu.com

李宝富(1983~), 男, 博士研究生, 主要从事资源利用与生态安全研究。E-mail: lb0102@sohu.com

收稿日期: 2010-09-20 接受日期: 2010-12-14

loss (36.47%) in the surface 0~20 cm soil layer was highest while that (7.31%) in the 80~100 cm soil layer was lowest. The rate of salt accumulation (4.55%) in the surface soil was about 12 times that in the 20~40 cm soil layer. While desalting still occurred below the 40 cm soil layer, that in the 40~80 cm soil profile decreased. Desalting rate (9.03%) in the 80~120 cm soil layer increased.

Key words Arid farmland, Irrigation, Soil profile, Water and salt content, Spatial and temporal variation, Water loss rate, Soil salt accumulation rate, Desalting rate

(Received Sep. 20, 2010; accepted Dec. 14, 2010)

土壤盐渍化和灌溉水资源短缺是影响干旱区经济可持续发展的重要因素, 而不合理的灌溉方式则会引起土壤次生盐渍化, 从而制约干旱区经济的发展。因此, 加强在不同条件下由灌溉引起的盐渍化区土壤水、盐变化的研究就显得尤为重要。许多学者^[1-6]对特大暴雨、蒸散发以及微咸水灌溉等条件下土壤水、盐运移进行了研究, 且取得一定成果。

土壤特性受到诸多自然(土壤质地、植被、气候等)和非自然因素(人类耕作活动等)的影响, 其时空变异是一个复杂的物理、化学过程。20 世纪 70 年代以来, 土壤特性的空间变异或其他农田特征变异定量化研究一直是关注的热点^[7]。对于其研究方法和内容, 许多研究者都做过详细介绍^[8], 其中最重要的就是地统计学方法。多数研究者着重讨论了土壤物理性质、土壤水分、盐分和养分的空间变化问题^[9-14]。目前, 在土壤水、盐的动态变化与时间相结合方面的研究尚需深入。

本文对比研究了灌溉前后一定时间序列上干旱区农田土壤盐分和水分的空间变异性、动态变化及逆盐渍化程度, 对合理布局种植结构, 改善田间管理、土地资源的利用和农业水利技术的应用有着重要意义。

1 研究区概况

奇台县地处东经 89°13'~91°22', 北纬 43°25'~49°29', 位于新疆昌吉州东部, 东临木垒哈萨克自治县, 南隔天山与吐鲁番、鄯善县相望, 西连吉木萨尔县, 北接阿尔泰地区的富蕴县、青河县, 东北部与蒙古接壤, 边界线长 131.47 km, 是新疆的边境县之一。年均气温 4.7 °C, 7 月份极端最高气温 43 °C, 1 月份极端气温为-42.6 °C, 年平均降水量为 176 mm,

蒸发潜力 2 141 mm, 无霜期平均 156 d, 年日照时数 2 840~3 230 h。

研究区位于绿洲与古尔班通古特沙漠交错带的奇台县满营湖。由于不合理的水利设施——平原水库的修建, 目前非灌溉期地下水位较高, 一般在 1.5~4.0 m, 平均矿化度为 2.2 g·L⁻¹。土壤盐渍化严重, 土壤 pH 较高(>8.0), 碱性较强, 基本物理性质如表 1 所示。自然植被简单, 常见的有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、红柳(*Tamarix chinensis*)、花花柴(*Karelinia caspica*)和猪毛菜(*Salsola collina*)等。

2 材料与方法

2.1 试验设计

2008 年 8 月 9 日, 在耕种 3 年的油菜地(*Helianthus annuus*, 行距 60 cm, 株距 32 cm, 平均株高约 1.3 m, 覆盖度约 70%)上选择 6 m×80 m 的试验区, 以 2 m×10 m 为间距, 共设 36 个土壤剖面采集土样(图 1), 并对其点位进行准确标记。每一剖面以 20 cm 为 1 层, 分别在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 和 100~120 cm 深度采样。初次(8月10日)采样后, 对试验区进行灌溉, 灌溉量为 144 m³, 对应灌溉定额为 3 000 m³·hm⁻²。灌溉后 1 周和 3 周分别在原标记点附近进行取样, 以保证试验准确性。3 次采样共采集 648 个样品。采集的土样混合均匀后, 一部分用烘干法测得土壤质量含水率, 其余在实验室内自然风干, 分散, 过 1 mm 筛。可溶性总盐与电导率之间的换算关系紧密^[10]。因此, 将制备好的土壤样品, 按水土比 5:1 制备成土壤浸提液, 使用 DDS-307A 型电导率仪测定土壤电导率。

表 1 试验地土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of experimental soil

土层深度 Soil depth (cm)	粉砂 Silt		极细砂 Very fine sand		细砂 Fine sand		中砂 Medium sand		粗砂 Coarse sand		%
	0.002 mm	d<0.05 mm	0.005 mm	d<0.1 mm	0.1 mm	d<0.25 mm	0.25 mm	d<0.5 mm	0.5 mm	d<1 mm	
0~20	6.17		73.86		14.49		4.96		0.52		
20~40	6.24		73.78		15.06		4.29		0.91		
40~60	6.36		74.71		14.58		3.98		0.36		
60~80	5.22		68.37		18.75		7.15		0.47		
80~100	4.73		60.57		23.31		10.47		1.30		

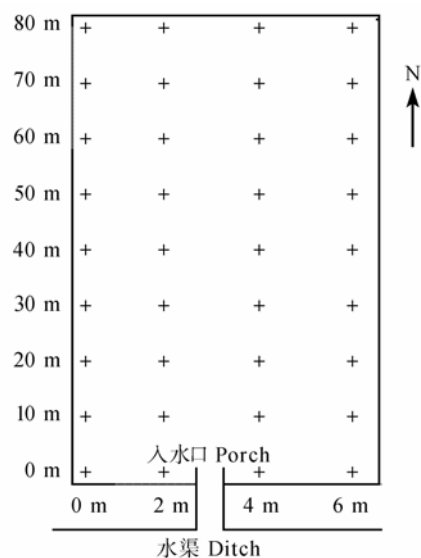


图1 试验地样点布局(6 m×80 m, +表示采样点)
Fig. 1 Distribution of sampling points in the experiment site (6 m×80 m; + indicates sampling points)

2.2 数据处理

本文试验数据主要运用地统计学方法进行统计分析。同时,对数据进行正态性检验,对不服从正态分布的数据取对数,使之符合地统计分析的要求,并通过狄克松(Dixon)法进行 $P=0.01$ 水平下的异常值检验。

地统计学是研究区域化变量空间分布结构特征规律的有效手段,它的基本工具——变异函数,可以反映和刻画区域化变量的许多性质^[15-18]。理论变异函数的模型有3个重要参数,其中块金常数 C_0 可反映区域化变量随机性大小,基台值 C_0+C 可以反映变量变化幅度或系统的总变异程度,变程 a (又称自相关距)表明变量自相关变化的尺度。块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比例,可反映变量的空间相关程度,一般认为, $C_0/(C_0+C)<25\%$,说明变量具有强烈的空间自相关性; $C_0/(C_0+C)$ 在 $25\%\sim75\%$ 之间,变量具有中等的空间相关性; $C_0/(C_0+C)>75\%$ 时,变量空间相关性很弱^[10]。

一般对衡量观测值变异程度的统计量——变异系数 C_V 值的评估如下:当 $C_V<0.1$ 时,称弱变异性;当 $0.1\leq C_V<1.0$ 时,称中等变异性;当 $C_V\geq 1.0$ 时,

称强变异性^[19]。

绘图分析主要在DPS V8.01、SPSS V13.0和GS+ V7等软件上进行。

3 结果与分析

3.1 灌溉前后土壤水、盐含量的相关性分析

3.1.1 剖面平均土壤水、盐含量相关性

由表2可知,虽然由灌溉前(相关系数为0.843)到灌溉后1周(相关系数为0.697),再至灌溉后3周(相关系数为0.673),剖面平均含水量与含盐量的相关系数逐渐减小,但灌溉并没有显著改变土壤水、盐的相关性,而是一直表现出极显著正相关性,表明剖面水分与盐分的变化关系密切。

3.1.2 各层土壤水、盐含量相关性

灌溉前,剖面各层水、盐含量呈极显著正相关。灌溉后1周,40~80 cm及100~120 cm土层水、盐含量相关性较差,其他层仍呈极显著相关。灌溉后3周,仅40~60 cm土层水、盐含量相关性较差,其他层呈极显著相关。以上结果表明,虽然灌溉后较短时间(1周)内,各层土壤水、盐相关性较低,但随时间推移(3周),剖面下部(60 cm以下)土壤水、盐相关性逐渐加强,也体现出人类活动对土壤水、盐之间相关性有一定影响。

3.2 灌溉前后土壤水、盐含量统计特征

由表3可知,灌溉前,土壤剖面各层含水量较低,且各土层之间差异较小,在 $15.25\%\sim16.70\%$ 之间。各层土壤水分及剖面平均含水量的变异系数(0.19~0.30)不大,均属于中等(偏弱)变异性。植被根系分布层(20~40 cm)盐分含量($2.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高,其他层均随土层深度的增加,含盐量逐渐减少。土壤盐分的变异系数(0.60~1.03)较大,由上层到下层,变异系数逐渐减小,表明盐分的变异性与土层深度呈反比。40 cm以上土壤盐分属强变异性,以下及剖面平均含盐量属中等(偏强)变异性。

灌溉后1周,土壤剖面各层含水量的差异性加大(最大差额10.06%),并且随着土层深度的增加而减少。其中,以表层含量(33.45%)最高,为底层的1.43倍。因灌溉脱盐作用,剖面各层(100 cm以上)含盐量较灌溉前均呈减少趋势,仅底层(100~120 cm)

表2 灌水前后不同土层土壤水、盐含量的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between soil water and salt contents of different soil layers before and after irrigation

时期 Time	土层深度 Soil depth (cm)						土壤剖面的平均值 Average correlation coefficient of soil profile
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120	
灌溉前 Before irrigation	0.52**	0.67**	0.79**	0.76**	0.77**	0.45**	0.843**
灌后1周 One week after irrigation	0.67**	0.59**	0.28	0.25	0.50**	0.30	0.697**
灌后3周 Three weeks after irrigation	0.64**	0.57**	0.24	0.45**	0.51**	0.55**	0.673**

**表示极显著相关($P<0.01$) ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 3 灌溉前后不同土层土壤水、盐含量统计特征值
Table 3 Statistic characteristics of soil water and salt contents in different depths before and after irrigation

土层深度 Soil depth (cm)	土壤特性 Soil characteristics	平均值 Average			变异系数 Variation coefficient		
		灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation	灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation
0~20	水分 Water (%)	15.31	33.45	21.25	0.28	0.08	0.11
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.78	2.20	2.30	1.03	0.96	0.96
20~40	水分 Water (%)	16.68	29.00	21.67	0.20	0.13	0.18
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.82	2.64	2.65	1.01	0.99	0.98
40~60	水分 Water (%)	16.23	25.17	21.63	0.22	0.11	0.10
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.60	2.32	2.06	0.97	0.96	0.89
60~80	水分 Water (%)	15.25	25.04	21.61	0.30	0.11	0.13
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.35	1.98	1.74	0.87	0.83	0.77
80~100	水分 Water (%)	16.21	23.39	21.68	0.27	0.11	0.09
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.17	2.16	1.91	0.69	0.68	0.62
100~120	水分 Water (%)	16.70	23.47	20.42	0.21	0.12	0.14
	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.02	2.16	2.02	0.60	0.55	0.53
平均值	水分 Water (%)	16.07	26.58	21.38	0.19	0.06	0.08
Average	盐分 Salt (g·kg ⁻¹)	2.46	2.24	2.11	0.82	0.81	0.80

含盐量增加,充分表明灌溉使土壤盐分向剖面底层聚集。与灌溉前相比,土壤剖面各层水、盐含量的变异系数均减小。各层土壤含水量的变异系数在 0.08~0.13 之间,其中,20~40 cm 变异系数最大,这主要是因为植被根系对水分的积聚作用。由于表层含水量最高,较大程度上弥补了土层之间的差异性,故其和剖面平均含水量均转为弱变异性,而其他层变异性未变。40 cm 深度以下土壤含盐量变异性增大,转为中等(偏强)变异性,其他层及剖面平均含盐量的变异性没有发生变化,但变异系数减小,这是因为按剖面从上到下的顺序,通过各层的水量逐渐减少。

灌溉后 3 周,剖面各层土壤含水量为 20.42%~21.68%,且各层差异减小。大部分土层含水量的变异系数增大,但均小于灌溉前。除 80~100 cm 和剖面平均含水量(弱变异性)外,其他各层仍为中等(偏弱)变异性。这是由于土壤蒸散及下渗使得剖面各层含水量逐渐减少,致使其空间差异性增大。各层含盐量在 1.74~2.65 g·kg⁻¹ 之间,仍是 20~40 cm 土层含量最高,主要是由于植被根系对盐分的吸附作用,阻碍了盐分向下层运移。土壤各层及剖面平均含盐量变异系数继续减小,但仍属于中等变异性,变异性最大层出现在 20~40 cm,最小层仍为底层(100~120 cm)。以上结果显示,无论灌溉与否,20~40 cm 土层水盐含量基本上都是最高的。

3.3 灌溉前后土壤水、盐含量的变化

3.3.1 剖面平均土壤水分、盐分变化速率

与灌溉前相比,灌溉后 1 周内,剖面平均土壤含水量增加率为 65.40%。灌溉水分下渗量大,剖面

平均脱盐速率较快,约为 0.031 g·kg⁻¹·d⁻¹,剖面平均脱盐率达 8.94%(表 3)。1 周后至 3 周内,平均含水量减少率为 19.56%;水分下渗量减少,脱盐速率和脱盐率明显降低,分别为 0.009 g·kg⁻¹·d⁻¹ 和 5.80%。

3.3.2 各层土壤水分、盐分的变化速率

由图 2 可知,灌溉后 1 周,剖面上层(0~40 cm)土壤水分含量较高,占整个剖面的 35.15%(表 3),明显高于下层(40~120 cm)。随着土层深度的增加,剖面各层脱盐率呈“之”字型波动。表层(0~20 cm)土壤脱盐率(20.86%)最大,而 80~100 cm 仅为 0.46%。灌溉的脱盐效果明显,脱盐深度可达 100 cm。20~40 cm 土壤脱盐率明显变小,且小于 40~80 cm,这是因为植被根系处于此层,对土壤盐分有集聚作用。剖面在 0~100 cm 土壤脱盐率均为正值,而在 100~120 cm 为负值,表明 100~120 cm 土层处于积盐阶段,积盐率为 6.93%。这是由于灌溉后上层盐分随水分下移所致。

由图 2 可知,灌溉后 3 周与灌溉后 1 周相比,剖面各层土壤含水量明显降低,表层(0~20 cm)水分减少率(36.47%)最大(表 3)。各层土壤脱盐率发生显著变化,100~120 cm 土壤脱盐率转为正值,表明脱盐深度有所增加,已大于 120 cm(图 2)。但 0~40 cm 土壤脱盐率转为负值,说明已进入积盐期,这与土壤蒸发及植物蒸腾作用强烈有关。其中,0~20 cm 积盐率(4.55%)最大,20~40 cm 积盐刚开始,积盐率仅为 0.38%。40~80 cm 土层,脱盐率基本低于灌溉后 1 周,而在 80~120 cm,脱盐率则明显升高,平均脱盐率达 9.03%。这是因为在此时间段内,上层土壤水分

下渗到底层, 通过剖面底层单位面积内的水量增加, 土壤盐分伴随着水分继续下渗, 使剖面盐分下移。

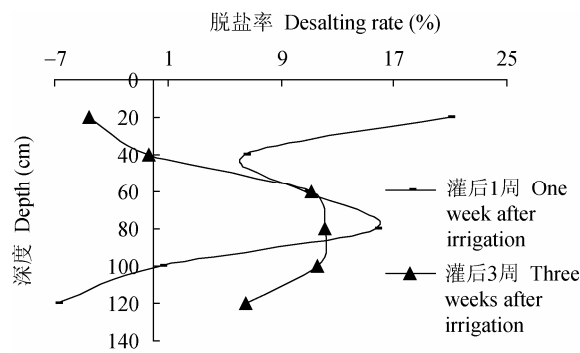


图 2 灌溉后各层土壤脱盐率变化
Fig. 2 Changes of desalting rate in every soil layer after irrigation

3.4 灌溉前后土壤水、盐的空间变异特征

3.4.1 剖面平均土壤水、盐含量的空间变异性

灌溉后, 剖面平均土壤含水量的块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 值呈增大趋势, 空间自相关性由强烈转为中等, 自相关距减小(表 4), 表明灌溉使剖面平均含水量空间自相关性减弱。而剖面平均含盐量

的 $C_0/(C_0+C)$ 值先减小后增大, 至灌溉后 3 周已由灌溉前及灌溉后 1 周的强烈空间自相关性变为中等强度的自相关性, 自相关距先增大后减小。

3.4.2 各层土壤水、盐含量的空间变异性

灌溉前, 剖面各相邻层之间土壤含水量的理论模型各不相同; 而各层土壤含盐量的理论模型在 40 cm 以上(高斯模型)相同, 40~100 cm(球状模型)的理论模型一致, 100~120 cm 为指数模型(表 4)。40~60 cm 及 80~100 cm 土壤含水量 [$C_0/(C_0+C) > 25\%$] 具有中等空间自相关性, 而其他各层均具有强烈的空间自相关性 [$C_0/(C_0+C) > 25\%$]。土壤含盐量以受外界随机性因素影响为主的表层 0~20 cm 及受土壤内部结构作用为主的底层 100~120 cm [$C_0/(C_0+C) > 25\%$] 具有中等空间自相关性, 其他层均有强烈的空间自相关性。表层(0~20 cm)土壤含水量的变程(2.64 m)最小, 这是因为表层水分易于受到外界蒸发等各种随机性因素的影响。随着深度的增加, 含水量的变程先增大后减小, 在 60~80 cm 土层达到最大值(77.44); 而土壤含盐量的变程在 20~40 cm 土层最小, 这主要是由于植被根系的生长对盐分分布的影响作用, 其他

表 4 灌溉前后土壤水、盐含量理论半方差函数模型及其参数
Table 4 Semi-variance models and their parameters of soil water and salt contents before and after irrigation

土层深度 Soil depth (cm)	土壤特性 Soil characteristics	模型类型 Model type			$C_0/(C_0+C)$			变程 Variable range (m)		
		灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation	灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation	灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation
0~20	水分	指数	球型	球型	0.103	0.354	0.101	2.64	35.19	2.47
	Water (%)	Exponential	Spherical	Spherical						
	盐分	高斯	球型	球型	0.352	0.002	0.358	36.39	6.61	16.97
20~40	Salt (g·kg ⁻¹)	Gaussian	Spherical	Spherical						
	水分	球型	球型	指数	0.101	0.220	0.470	6.66	6.46	23.84
	Water (%)	Spherical	Spherical	Exponential						
40~60	盐分	高斯	高斯	高斯	0.170	0.235	0.271	26.04	28.96	14.70
	Salt (g·kg ⁻¹)	Gaussian	Gaussian	Gaussian						
	水分	高斯	指数	指数	0.430	0.494	0.500	17.62	22.09	12.59
60~80	Water (%)	Gaussian	Exponential	Exponential						
	盐分	球型	高斯	高斯	0.049	0.241	0.289	54.30	20.06	22.62
	Salt (g·kg ⁻¹)	Spherical	Gaussian	Gaussian						
80~100	水分	球型	球型	指数	0.180	0.303	0.151	77.44	11.79	2.72
	Water (%)	Spherical	Spherical	Exponential						
	盐分	球型	指数	球型	0.093	0.012	0.170	54.96	22.91	79.67
100~120	Salt (g·kg ⁻¹)	Spherical	Exponential	Spherical						
	水分	指数	指数	指数	0.310	0.077	0.051	24.96	2.03	2.01
	Water (%)	Exponential	Exponential	Exponential						
剖面平均	盐分	球型	指数	球型	0.095	0.071	0.155	50.63	20.66	37.88
	Salt (g·kg ⁻¹)	Spherical	Exponential	Spherical						
	水分	高斯	高斯	高斯	0.046	0.250	0.231	3.24	2.23	7.62
Average of soil profile	Water (%)	Gaussian	Gaussian	Gaussian						
	盐分	指数	球型	高斯	0.393	0.163	0.389	46.15	31.55	17.08
	Salt (g·kg ⁻¹)	Exponential	Spherical	Gaussian						
剖面平均	水分	指数	高斯	高斯	0.203	0.278	0.364	39.66	32.18	11.84
	Water (%)	Exponential	Gaussian	Gaussian						
	盐分	高斯	高斯	高斯	0.158	0.129	0.244	24.12	25.34	19.06
Average of soil profile	Salt (g·kg ⁻¹)	Gaussian	Gaussian	Gaussian						

各层的变程相差不大,但也是在 60~80 cm 深度有最大值(54.96)。

1 周后,仅有 0~20 cm 及 40~60 cm 深度含水量的理论模型发生变化。由于植被根系在 20~40 cm 土层的影响作用及下渗到 60 cm 以下水量明显减少,使其含水量模型均未发生变化。而含盐量除 20~40 cm 土层外,其他各层盐分的理论模型均与灌溉前不同。除 80~100 cm 土层外,其他各层土壤含水量的 $C_0/(C_0+C)$ 值均增大,反映出灌溉使各层水分的空间自相关性减小。而各层(除 20~60 cm 外)土壤含盐量的 $C_0/(C_0+C)$ 值均减小,表明灌溉使各层盐分的空间自相关性增强。0~20 cm 及 40~60 cm 土壤含水量的变程变大,其他层的变程均变小,体现出各层水分的自相关距减小。各层含盐量的变程(除 20~40 cm 外)

均呈减小趋势,说明各层盐分的自相关距减小。

灌溉后 3 周与灌溉后 1 周相比,剖面各层含水量的理论模型仅有 20~40 cm 和 60~80 cm 两层发生了变化,其他各层均未变。而含盐量的理论模型在 60 cm 以上未变,60 cm 以下均有改变。这是因为 1 周后剖面上部水分继续下渗补给下部而引起盐分继续下移。除 20~60 cm 深度外,各层土壤含水量的 $C_0/(C_0+C)$ 值均减小,表明各层水分的空间自相关性增强。剖面各层含盐量的 $C_0/(C_0+C)$ 值均增大,反映出其空间自相关性减弱(表 4)。仅有 20~40 cm、100~120 cm 土层含水量的变程增大,含盐量的变程减小,而其他各层水分的变程减小,盐分的变程增大。灌溉后 3 周与灌溉前相比,80 cm 以上各层含水量的理论模型均发生改变,80 cm 以下则未发生变化,这

图 3 灌溉前后土壤水分空间分布图(A: 灌溉前; B: 灌溉后 1 周; C: 灌溉后 3 周)

Fig. 3 Spatial distribution of soil moisture before and after irrigation
(A: Before irrigation; B: One week after irrigation; C: Three weeks after irrigation)

反映出灌溉主要对土壤剖面的中上层水分有较大影响。表层及 60~100 cm 含水量的 $C_0/(C_0+C)$ 值减小, 其他层则增大。底层(100~120 cm)含盐量的 $C_0/(C_0+C)$ 值与灌溉前相当, 而其他各层均呈增大趋势, 表明盐分的空间自相关性仍小于灌溉前。水分的变程(20~40 cm、100~120 cm 除外)及盐分的变程(除 60~80 cm 外)大都小于灌溉前, 显示出水盐的自相关距均小于灌溉前。

3.5 土壤水、盐含量的空间分布特征

利用克里格法对各时期土壤剖面各层水、盐含量进行插值, 得到其三维空间分布图。一是由于相邻层水、盐含量变化具有一定的连续性及相似性, 二是限于篇幅, 本文选取具有代表性的土层(0~20 cm、40~60 cm 及 80~100 cm)进行其空间分布特征的分析。

3.5.1 各层土壤含水量的空间分布

灌溉前, 水平方向上(由南向北)以 30 m 为界, 南、北侧各层含水量分布状况类似, 但前者含量大(图 3A), 后者含量小。试验田虽长时间未进行灌溉, 但 0~30 m 地段靠近灌溉水渠, 渠中常有水流, 水分必然通过土体渗透, 致使其土壤水分含量高于远离灌溉水渠的地段。另外, 由于地表蒸发强烈, 表层(0~20 cm)的 0~30 m(南侧)与 30~80 m 地段(北侧)的水分空间分布的高度差明显小于其他层。

灌溉后 1 周, 由南向北的方向上, 剖面各层水分含量均呈逐渐减少趋势(图 3B)。一是与灌溉前水分的空间分布有关, 二是与灌溉方式有关, 在靠近灌溉入水口的地段, 水分下渗量大。另外, 表层(0~20 cm)的 0~30 m 与 30~80 m 地段水分含量的高

图 4 灌溉前后土壤盐分空间分布图(A: 灌溉前; B: 灌溉后 1 周; C: 灌溉后 3 周)

Fig. 4 Spatial distribution of soil salt before and after irrigation

(A: Before irrigation; B: One week after irrigation; C: Three weeks after irrigation)

表 5 灌溉前后剖面平均土壤水、盐含量变化特征
Table 5 Variation characteristics of water and salt contents of soil profile before and after irrigation

项目 Item	水分 Water content			盐分 Salt content		
	灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation	灌溉前 Before irrigation	灌溉后 1 周 One week after irrigation	灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation
平均值 Average	低 Low (16.07%)	高 High (26.58%)	中 Medium (21.38%)	高 High (2.46 g·kg ⁻¹)	中 Medium (2.24 g·kg ⁻¹)	低 Low (2.11 g·kg ⁻¹)
变异系数 Coefficient of variation	高 High (0.19)	低 Low (0.06)	中 Medium (0.08)	高 High (0.82)	中 Medium (0.81)	低 Low (0.80)
脱盐率 Desalination rate					高 High (8.94%)	低 Low (5.80%)
空间自相关性 Spatial autocorrelation	强烈 Strong	中等 Medium	中等 Medium	强烈 Strong	强烈 Strong	强烈 Strong
变程 Variable range (m)	大 Long (39.66)	中 Medium (32.18)	小 Short (11.84)	中 Medium (24.12)	大 Long (25.34)	小 Short (19.06)

度差较小,且小于灌溉前,是由于表层灌溉水量大,一定程度上弥补了其空间分布的差异性。而其他各层水分分布的高度差较大,且底层(80~100 cm)高度差最大,是因为随着土层深度的增加,水分下渗量逐渐减少,因此剖面下部各层水分空间分布差异性的削减程度要低于上部。

灌溉后 3 周与灌溉后 1 周相比,因表层(0~20 cm)土壤蒸发强,水分损耗量大,其水分分布的差异性增大(图 3C)。而底层(80~100 cm)则与之相反。这是由于下渗到剖面底部的水量增大,且底层无蒸发耗水,使其空间分布趋于均匀化。剖面中部水分下渗量少于底层,但蒸发损耗少于表层,故 40~60 cm 深度的水分空间分布的差异性变化较小。

3.5.2 各层土壤含盐量的空间分布

灌溉前,各层土壤含盐量在水平方向(由南向北)30~80 m 地段上分布均比较“平坦”,盐分的差异性较小,而在 0~30 m 段上盐分含量高且变化大(图 4A),主要与水分的空间分布有关,水渠中渗透到土壤中的水分,随土壤蒸发向上层移动,从而带动了盐分的表聚。

灌溉后 1 周,含盐量在垂直方向上变化显著(图 4B),0~20 cm 及 40~60 cm 深度“凹陷”与“隆起”的盐分高度差明显减小,且表层最显著;而 80~100 cm 深度盐分分布变化较小。造成这种盐分分布规律的主要原因是通过剖面各层的水量不同,剖面上部水量大于下部。这印证了“盐随水来,盐随水去”。

灌溉后 3 周,由于此时间段内通过剖面的水量较少,各层盐分空间分布的变化幅度较小,基本延续了灌溉后 1 周的分布态势(图 4C)。其中,表层(0~20 cm)盐分有增加趋势,40 cm 深度以下各层盐分仍呈减少趋势。原因是此时期剖面上部的水分一部分通过蒸发向上迁移,一部分向下层渗透,从而带动了盐分运移。

4 结论

灌溉后 1 周内,剖面各层土壤水、盐含量的变异

系数均变小;灌后 1 至 3 周,各层土壤含水量的变异系数增大,而各层土壤含盐量的变异系数仍减小。灌后 1 周,100~120 cm 深度水分增加率(40.54%)最少,约为表层(0~20 cm)的 1/3。表层(0~20 cm)脱盐率(20.86%)最大。随着土层深度的增加,脱盐率逐渐减小,脱盐深度可达 100 cm。底层(100~120 cm)仍处于积盐期,积盐率为 6.93%。灌后 3 周,各层土壤含水量逐渐减小,表层失水率(36.47%)、积盐率(4.55%)均最大。20~40 cm 土层积盐率(0.38%)较小,约为表层(0~20 cm)的 1/12。40~80 cm 土层脱盐率减小,而 80~120 cm 土层脱盐率(9.03%)增大,脱盐深度超过 120 cm。灌溉使得土壤剖面平均土壤含盐量减少,脱盐率由快变慢(表 5)。剖面平均水、盐含量均由灌溉前的高变异降为低变异,平均水含量的空间自相关性减弱,变程减小;平均盐含量的空间自相关性始终强烈,而变程先增大后减小。

灌溉前,各土层在水平方向上,南侧的水、盐分含量高于北侧。灌溉后,南侧(入水口)的水分增加量及脱盐量大于北侧,原因是入水口处灌溉水量大,并且脱盐效果好。剖面垂直方向上,水、盐在不同时间、空间上的含量大小,主要取决于该时空通过水量的多少。剖面平均及各层(除个别层次外)水、盐含量在空间上(试验地南、北)和时间上(灌溉前、后)均呈现出极显著正相关性,反映出两者时空变化的“同步性”。

参考文献

- [1] 张妙仙,杨劲松,李东顺.特大暴雨作用下土壤盐分运移特征研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):47-49
- [2] 杨艳,王全九.微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J].水土保持学报,2008,22(1):13-19
- [3] 张妙仙,毛任钊.蒸散发条件下农田土壤水盐动态简化模型[J].中国生态农业学报,2003,11(3):102-105
- [4] 张永波,王秀兰.表层盐化土壤区咸水灌溉试验研究[J].土壤学报,1997,34(1):53-59
- [5] 冯广平,姜卉芳,董新光,等.干旱内陆河灌区地面灌溉条

- 件下土壤水盐运动规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 82-84
- [6] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71-76
- [7] Hillel D. Research in soil physics: A review[J]. Soil Sci, 1991, 151: 30-34
- [8] 李艳, 史丹, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-182
- [9] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 460-466
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 刘光明. 土壤盐分和含水量的空间变异性及其 CoKriging 估值——以黄河三角洲地区典型地块为例[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 133-138
- [11] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73
- [12] 秦鱼生, 涂仕华, 冯文强, 等. 成都平原水旱轮作种植下土壤养分特性空间变异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 355-359
- [13] 姚荣江, 杨劲松. 电磁感应仪用于土壤盐分空间分布的协同克里格估值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 41-46
- [14] 赵成义, 王玉潮, 李子良, 等. 田块尺度下土壤水分和盐分的空间变异性[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 252-256
- [15] Brooker P I. Irrigation equipment selection to match spatial variability of soils[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33(6/7): 619-623
- [16] Junior V V, Carvalho M P, Dafonte J, et al. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferrallosol[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 85(1/2): 166-177
- [17] Ferrero A, Usowicz B, Lipiec J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 84(2): 127-138
- [18] Aşkin T, Kızılkaya R. Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(4): 230-237
- [19] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998

《中国生态农业学报》编委会会议成功召开

《中国生态农业学报》编委会会议于2011年4月16日在中国科学院遗传与发育生物学研究所召开。主编刘昌明院士, 编委曹志平、康绍忠、李周、梁永超、林文雄、刘健、刘金铜、刘孟雨、刘小京、刘彦随、马七军、欧阳志云、沈彦俊、万方浩、吴普特、杨林章、杨永辉、张万军参加了会议, 中国科学院出版委员会办公室主任金建辉, 生态经济学会副秘书长于法稳研究员, 科学出版社期刊副总编辑、北京中科期刊出版有限公司总经理肖宏和总经理助理岳凌生, 《遗传》副主编李绍武也应邀参加了会议。

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心副主任杨永辉主持会议, 中国科学院遗传与发育生物学研究所副所长、农业资源研究中心主任马七军致辞, 并简要介绍了中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心科研和《中国生态农业学报》情况, 对编委会工作给予充分的肯定, 期盼各位编委一如既往地支持学报的工作, 共同把《中国生态农业学报》办好。

与会的编委和专家围绕着如何突出学报特色、吸引优秀稿件、提高学术水平等方面开展了热烈的讨论, 在明确期刊定位、突出期刊特色、办刊形式、栏目设置、提高期刊国际影响及充分发挥编委作用等方面提出了很多建设性意见。

《中国生态农业学报》主编刘昌明院士简要回顾了《中国生态农业学报》的发展历史, 并进行了会议总结, 他指出《中国生态农业学报》在不断地进步和完善, 正处在迅速发展阶段, 且势头良好。同时要求编辑部认真总结会上各位编委和专家提出的意见和建议, 逐条落实, 进一步促进期刊发展。刘昌明院士指出, 学报应适应不同作者、读者的需求, 办成灵活的期刊, 办成充满活力的期刊。

中国科学院出版委员会办公室主任金建辉、中国生态经济学会秘书长李周也发表了热情洋溢的讲话。

《中国生态农业学报》编辑部