

咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林土壤 水盐动态*

丁新原^{1, 2, 3} 周智彬^{1†} 徐新文¹ 王永东¹ 江 源³ 鲁晶晶^{1, 2} 常 青¹

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘 要 为揭示咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林的土壤水盐动态规律, 研究了 4—7 月份各灌水周期内土壤水盐的时间变化特征和二维空间分布格局。结果表明: (1) 咸水滴灌下的防护林土壤水盐动态具有显著的周期性规律; 一个周期内 (1~15 d), 水分先后经历了快速下降 (1~4 d)、缓慢变化 (4~10 d) 和基本稳定 (10~15 d) 三个时期, 整体呈幂函数递减规律 ($y=8.746t^{-0.270}$, $t=1, 2, 3\cdots$); 盐分则先后经历了脱盐 (1~7 d) 和积盐 (7~15 d) 两个阶段, 整体变化规律符合抛物线函数 ($y=0.009t^2-0.138t+2.269$, $t=1, 2, 3\cdots$)。 (2) 水平 0~60 cm 空间上的土壤水分呈一元线性递减分布, 而盐分呈一元线性递增分布; 垂直 0~120 cm 空间上的土壤水分表现为较明显的单峰曲线, 其峰值位于 20 cm 土层处, 而盐分分布满足逆函数模型, 并在表土层距滴头 45~60 cm 处有显著积盐现象, 含盐量高达 10~20 g kg⁻¹。由于受灌溉、蒸发、气温、降雨、植被等环境因素及土壤自身空间变异性等的影响, 具体不同时空尺度上的绿地土壤水盐动态既具有一致性规律又表现出差异性特征。本文可对区域土壤水盐动态预测、盐渍化评估以及灌水制度进一步优化等提供科学支撑。

关键词 咸水滴灌; 水盐动态; 人工防护林; 塔克拉玛干沙漠

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水作为荒漠生态系统水分的主要存在形式, 是制约植被生长的最大限制因子, 不仅对沙地土壤的发生、演化和土地生产力产生重要影响, 而且对整个荒漠生态系统的水热平衡起决定作用^[1], 还在荒漠生态系统结构稳定性保持和功能正常性发挥, 甚至是防风固沙等方面扮演着重要角色^[2-4]。同时, 由于沙漠地区的高强度蒸发, 沙地土壤水分很难维持一个相对平衡状态, 从而无法满足大多数

植物的正常用水需求, 这就促使了区域地下咸水资源的开发与利用。然而, “盐随水来, 盐随水去, 水去盐留”, 长期利用咸水尤其是高矿化度咸水对植被进行灌溉, 很可能会导致土壤盐渍化及次生盐渍化发生^[5-6], 从而危害植被正常生长, 降低土地生产力。因此, 在荒漠地区进行土壤水盐动态研究, 控制和解决好土壤盐渍化问题等是实现该区域生态恢复与植被重建工程可持续性的关键。

* 水利部公益性行业科研专项 (201401049)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050504)、国家自然科学基金项目 (41271341) 共同资助 Supported by Ministry of Water Resources' Special Funds for Scientific Research on Public Causes (No. 201401049), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA05050504), and the National Natural Science Foundation of China (No. 41271341)

† 通讯作者 Corresponding author: 周智彬, 男, 博士, 研究员, 主要从事植物生态学、水盐动态及荒漠化治理等研究。E-mail: zhoubz@ms.xjb.ac.cn

作者简介: 丁新原 (1990—), 男, 河南舞阳人, 博士研究生, 主要从事水盐动态、水土保持与植被生态等研究。E-mail: henandxy.well@163.com

收稿日期: 2015-05-13; 收到修改稿日期: 2015-07-10

塔克拉玛干沙漠地处我国极端干旱区,其地下丰富的咸水资源为腹地绿地种植和沙漠公路沿线防护林生态工程建设等提供了基础保障,然而,由于长期、连续的咸水灌溉,造成大量盐分进入土壤并不断积累。于是,土壤盐分含量增加是否引起盐渍化及其程度如何,咸水灌溉下的土壤水盐运移与再分布如何等一系列问题引发了一批学者的探索兴趣,具体涉及到水盐平衡及其动态^[7-9],水盐运移数值模拟^[10-11],水盐分布与再分布^[12-14]等内容。如周智彬等^[7]应用水平衡原理对塔里木沙漠公路防护林土壤水分运动规律进行研究,估算了塔里木沙漠公路防护林体系的耗水特征,并指出防护林节水灌溉仍具有较大节水空间,闫冰等^[11]研究了防护林土壤的水分入渗过程,并认为不同土层间的入渗特性存有差异;王永东等^[14-15]在研究防护林土壤表层盐分特征时发现,表层土壤的盐分含量高、表聚性强烈,并初步揭示了咸水灌溉条件下土壤的盐渍化状况及其主要驱动因子。然而,以上研究均是关于土壤水盐垂直空间变化方面的成果,水平空间方面的却未见报道;且其时间尺度以分钟、小时、季度和年为主,灌水周期内的水盐日动态则较少涉及。鉴于此,本文通过开展野外采样与室内测定实验,研究了塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林在4—7月份的各灌水周期内土壤水盐的三维时空特征。以求掌握以时间日为步长的土壤水盐变化规律,实现区域土壤水盐的动态模拟与预报。同时,也希望为区域的土壤盐渍化评估与防治、灌水制度进一步优化、地下咸水资源的科学管理与高效利用等提供科学指导,以服务于防护林生态工程的后期建设与维护。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔克拉玛干沙漠研究站(塔中沙漠植物园)及附近的塔里木沙漠公路人工防护林,地理坐标为39° 01'N, 83° 36'E,海拔在1 100 m左右。据塔中气象站资料,该区年平均气温12.4℃,最热月(7月)平均气温28.2℃,沙面最高温度可达75.3℃,最冷月(12月)平均气温-8.1℃,气温年较差为36.3℃,极端最高气温45.6℃,极端最低气温-22.2

℃,极差为67.8℃;年平均降水量24.6 mm,平均相对湿度29.4%,年蒸发量3 639 mm;年平均风速2.5 m s⁻¹,最大瞬时风速20 m s⁻¹。人工防护林树种主要以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳属(*Tamarix*)、沙拐枣属(*Calligonum*)等高抗逆性的优良防风固沙植物为主,株行距约1 m×1 m,配置方式为行间混交。塔里木沙漠公路防护林全线采用滴灌的灌溉方式,滴灌管网布设采用一对一的方式(即一个滴头对应一颗植株,滴头位于植株主干茎处),灌溉咸水矿化度为3~30 g L⁻¹,每次灌溉量为30 L m⁻²,每次灌水时长为6~8 h;灌溉周期为15 d,每次灌水量为30 L m⁻²,冬季(11月至次年2月份)免灌。

1.2 试验方法

在防护林地梭梭属植株(始于2004年种植,株高约1~2 m)下选取合适的样地(立地、灌水等条件相同,滴头四周渗水比较均匀),在一个灌水周期内,分别于灌水后第1、4、7、10、13 d时进行土壤样品取样。垂直方向上,依次按照距地表0、10、20、40、60、80、100和120 cm的深度进行取样;水平方向上,依次按照距离滴头15、30、45和60 cm的长度进行取样。取样方法为土钻法,时间在上午9:00—11:00之间。每次取土样4×8×2个,即将二维空间内所有样点的土样均取2份,分别置于带有标签的铝盒和样袋内,一份用于测定土壤质量含水率(烘干法),一份用于测定土壤盐分含量(电导仪法)。一个灌水周期内取土样4×8×2×5个,取4个灌水周期,共计1280个土样。其中,各个灌水周期的取样分布在4个月份,按时间顺序依次为:4月13日—4月28日,5月13日—5月28日,6月13日—6月28日和7月13日—7月28日。

用环刀法(容积为100 cm³)测得试验地土壤垂直空间距离0、10、20、40、60、80、100和120 cm土层处的容重(同一土层处水平方向0~60 cm范围内的土壤容重视为相同),共重复三次。同时,分别配置7种(5%,2%,1%,0.5%,0.2%,0.1%,0.05%)不同浓度的KCL溶液,测其对应的电导率,得出盐分与电导率之间的函数关系,并将测得的电导率数值代入其中,求出其对应的盐分浓度(g L⁻¹),最后得出土样的盐分含量(g kg⁻¹)。

2 结 果

2.1 土壤水盐时间变化特征

土壤水盐周期期间变化：塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林在4—7月的各试验灌水周期内的土壤水盐时空动态特征如图1所示。整体上看，由于定期定量的咸水滴灌，绿地土壤水盐在时间上呈现出显著的周期性变化规律。

经计算，4—7月间，各试验灌水周期内的土壤总体平均含水量依次为6.03%、5.90%、7.99%和5.47%，平均含盐量依次为1.55、2.18、2.06和2.02 g kg⁻¹。在同等灌水条件下，与其他三个月份相比，6月份的试验灌水周期内有两次较为明显的降雨（分别发生在灌水后第10天和第11天，即6月23日和6月24日，降雨均大于25 mm），故其土壤水分含量相对最高。同时，自4月至7月，沙漠气温逐渐升高（表1），水分蒸散发强度不断加大，故土壤总体水分含量变化呈减小趋势；另一方面，由于不同月份递增的蒸散发强度，使得较浅土层范围内的土壤水分耗散加快，这就加剧了较深土层范围内的水分向上运动，且在此过程中进一步携带深层土壤盐分的向上转移并在较浅土层范围内逐渐积累，故其含盐量整体在4月份最低，在其余三个月份则相对较高；其中，又因雨水的淋洗作用，6月份的整体含盐量较5月份偏低。7月份的盐分水平与6月份很接近，这与梭梭植株对盐分的吸收有关。因为在7月份，梭梭的枝叶完全展开，且处于一年中吸水蒸腾最旺盛的时期^[9]，相比之下，植株在此月份内汲取更多水分的同时也吸收了相对较多的盐分，故该月份内的土壤整体盐分并不很高。

通过对各试验灌水周期期间土壤水盐的相同时间序列变化值进行相关性分析发现（表2），水分变化方面，4、5和7月份内各试验灌水周期之间的相关系数普遍较高，而三者与6月份内的相关系数均相对较低，甚至出现负相关；盐分变化方面，四个月份试验灌水周期之间的相关系数均相对较高。由表3，整体而言，研究尺度内，4、5和7月份与6月份间的土壤水分变化不同步，而其余月份相互间的土壤水分变化与盐分变化均较同步，且到达了一致性水平（ $p < 0.05$ ）。这表明，降雨（超过一定量）对土壤水分的周期性动态产生了较为显著的影响，而气温对其的影响作用不显著。因为4—7月份渐增的平均气温并未引起4、5和7月份内各试验灌

水周期期间土壤水分周期性动态的明显不同。同时，降雨与气温对土壤盐分的周期性动态的影响均不显著。据此，在忽略一定强度的降雨时，咸水滴灌下防护林土壤水盐的周期性变化规律具有稳定性，并不随月变化而表现出显著性差异。

表1 各试验（4—7月）灌水期间平均气温

Table 1 Mean temperatures of the four irrigation periods of the experiment

月 Month	距地面不同高度气温 Temperature for different height above ground (°C)			
	10 m	4 m	2 m	1 m
4月 April	16.11	15.37	14.93	47.82
5月 May	20.58	19.29	18.53	45.91
6月 June	24.44	23.89	23.63	54.20
7月 July	27.95	27.03	26.50	55.85

土壤水盐周期内变化：根据上文，不考虑降雨作用时，在研究防护林土壤水盐的周期内（日）变化特征时，不仅可忽略各月份灌水周期之间的差异性，还可将其视为重复性事件进行处理。本文即取三个非降雨月份（4、5和7月）内相应时空尺度上的含水率和含盐量均值作为分析灌水周期内土壤水盐时间动态的标准。由此，一个灌水周期内（1~15 d），防护林土壤水盐的时间（日）变化特征如图2所示。

水分方面：总体上，土壤水分随日增加而递减。其中，在灌水后1~4 d，含水率处于快速下降阶段，日均速率达1.05% d⁻¹，最大速率接近9.00% d⁻¹；在灌水后4~10 d，含水率处于缓慢下降阶段，日均速率为0.18% d⁻¹，最大速率为1.58% d⁻¹；在灌水后10~15 d，含水率基本保持稳定，日均变化速率不足0.05% d⁻¹，最大速率低于0.30% d⁻¹。同时，经比较分析，以上三个阶段的土壤含水率日均变化速率值分别处于10⁻²、10⁻³和10⁻⁴的数量级。基于此，可将灌水周期内的绿地土壤总体水分变化划分为三个阶段，即快速下降期（灌水后1~4 d），缓慢变化期（灌水后4~10 d）和基本稳定期（灌水后10~15 d）。由于沙质土壤蓄水性差，水分入渗快，大量灌溉水分短期内即可到达深层土壤，再加上蒸散发消耗，故土壤水分（尤指较浅土层范围）整体含量很快便由较高水平下降到较低水平；之后，土壤水分主要受蒸散发影响而下降，但由于

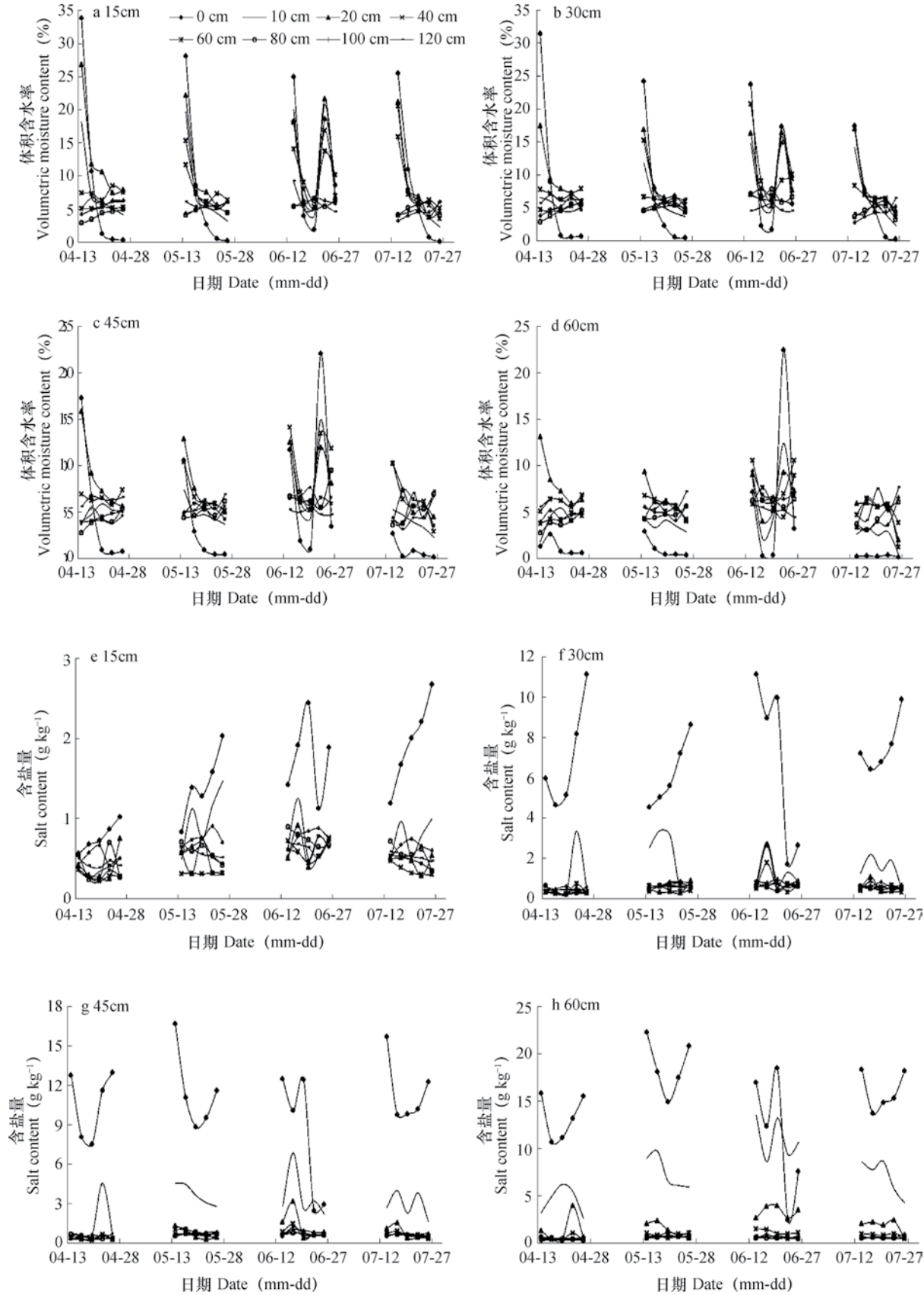


图1 各试验灌水周期(4—7月)土壤水盐时空动态

Fig. 1 Spatio-temporal dynamics of soil water and salt among during the irrigation periods of the experiment

表2 各试验灌水期间（4—7月）土壤含水率及含盐量的相关性

Table 2 Correlation between soil water and soil salt during the four irrigation period																	
时间 Time		水平空间 Horizontal space (0 ~ 60 cm)								垂直空间 Vertical space (0 ~ 120 cm)							
月 Month	天 Day	土壤含水率 Soil water content				土壤含盐量 Soil salt content				土壤含水率 Soil water content				土壤含盐量 Soil salt content			
		4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月
		April	May	June	July	April	May	June	July	April	May	June	July	April	May	June	July
4月 April	1 d	1.000	0.995	0.991	0.986	1.000	0.972	0.969	0.999	1.000	0.950	0.809	0.762	1.000	0.979	0.957	0.984
	4 d	1.000	0.987	0.919	0.975	1.000	0.998	0.929	0.995	1.000	0.582	-0.304	0.428	1.000	0.968	0.926	0.973
	7 d	1.000	0.834	0.115	0.797	1.000	0.992	0.999	1.000	1.000	0.903	0.572	0.784	1.000	0.988	0.992	0.995
	10 d	1.000	0.970	0.863	0.333	1.000	0.940	0.866	0.976	1.000	0.966	-0.480	0.856	1.000	0.985	0.587	0.996
	13 d	1.000	0.310	0.463	0.007	1.000	0.941	0.759	0.966	1.000	0.899	0.472	0.639	1.000	0.989	0.716	0.998
5月 May	1 d	—	1.000	0.998	0.997	—	1.000	0.887	0.973	—	1.000	0.940	0.916	—	1.000	0.996	1.000
	4 d	—	1.000	0.954	0.992	—	1.000	0.903	0.986	—	1.000	0.532	0.879	—	1.000	0.979	0.997
	7 d	—	1.000	0.643	0.998	—	1.000	0.986	0.993	—	1.000	0.846	0.910	—	1.000	0.997	0.998
	10 d	—	1.000	0.754	0.551	—	1.000	0.984	0.992	—	1.000	-0.545	0.960	—	1.000	0.487	0.997
	13 d	—	1.000	0.898	0.948	—	1.000	0.926	0.997	—	1.000	0.243	0.912	—	1.000	0.802	0.997
6月 June	1 d	—	—	1.000	0.995	—	—	1.000	0.969	—	—	1.000	0.929	—	—	1.000	0.993
	4 d	—	—	1.000	0.918	—	—	1.000	0.962	—	—	1.000	0.365	—	—	1.000	0.986
	7 d	—	—	1.000	0.688	—	—	1.000	0.999	—	—	1.000	0.688	—	—	1.000	0.999
	10 d	—	—	1.000	-0.036	—	—	1.000	0.955	—	—	1.000	-0.574	—	—	1.000	0.530
	13 d	—	—	1.000	0.791	—	—	1.000	0.896	—	—	1.000	-0.016	—	—	1.000	0.757
7月 July	1 d	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000
	4 d	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000
	7 d	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000
	10 d	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000
	13 d	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000	—	—	—	1.000

表3 各试验灌水周期（4—7月）之间土壤含水率及含盐量的总体相关性

Table 3 Holistic correlation between soil water and soil salt during the four irrigation periods																	
时间 Time		水平空间Horizontal space（0 ~ 60 cm）								垂直空间vertical space（0 ~ 120 cm）							
		土壤含水率Soil water content				土壤含盐量Soil salt content				土壤含水率Soil water content				土壤含盐量Soil salt content			
		4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月	4月	5月	6月	7月
		April	May	June	July	April	May	June	July	April	May	June	July	April	May	June	July
4月 April	1	0.985**	0.579	0.963**	1	0.865*	0.636*	0.926	1	0.920**	0.382	0.773*	1	0.955**	0.718*	0.980**	
5月 May	—	1	0.586	0.974**	—	1	0.837*	0.97	—	1	0.441	0.938**	—	1	0.841*	0.990**	
6月 June	—	—	1	0.552	—	—	1	0.867	—	—	1	0.375	—	—	1	0.816*	
7月 July	—	—	—	1	—	—	—	1	—	—	—	1	—	—	—	1	

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 下同 The same below

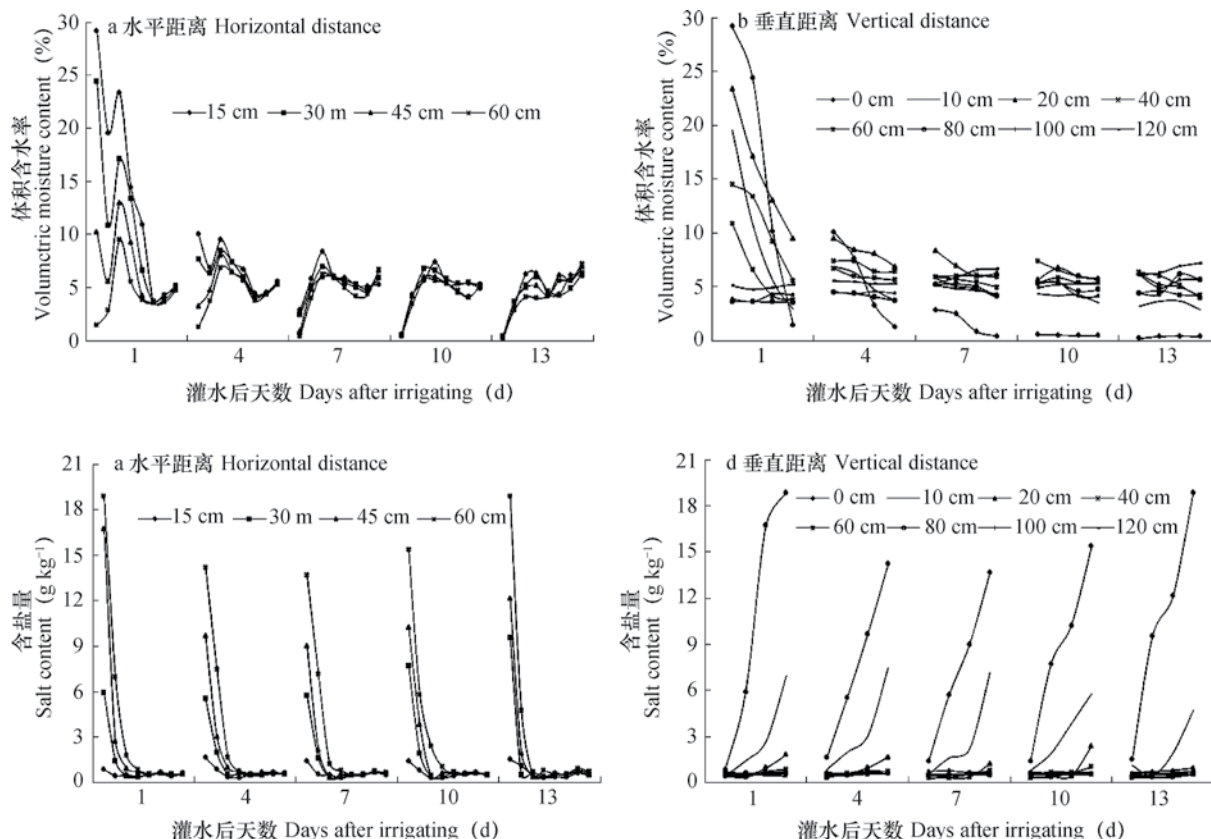


图2 灌水周期内 (1 ~ 15 d) 土壤二维空间水盐动态

Fig. 2 Two-dimensional spatial dynamics of soil water and salt during the irrigation periods

含量相对较低, 故水分下降程度较前者较缓; 在后期, 由于先前水分的大量损失, 在蒸发作用下, 整体土层主要接受来自较深土层的水分补给, 并在多种因素的综合影响下基本维持恒定。

盐分方面: 在灌水后第1天和第13~第15天内, 盐分含量较高, 平均含盐量高于 2.00 g kg^{-1} , 最大含盐量接近 20.00 g kg^{-1} ; 在灌水后第7 d内, 盐分含量最低, 平均含盐量 1.70 g kg^{-1} , 最大含盐量约为 13.50 g kg^{-1} ; 在其余时间内的水平居中。总体上, 土壤盐分随日变化先减后增。其中, 在灌水后1~7 d, 土壤处于脱盐阶段, 其平均脱盐速率为 $0.07 \text{ g kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$; 在灌水后7~15 d内, 土壤处于积盐阶段, 其平均积盐速率接近 $0.05 \text{ g kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 略低于脱盐速率。这是因为在前期阶段 (尤其是灌水后1~4 d), 土壤水分除因蒸散发消耗外, 仍存在较明显的下渗, 从而继续带动尺度内的盐分向深层土壤转移, 同时由于水分整体变化较迅速, 故对盐分的淋洗速率也就较快; 而在后期阶段, 由于浅层土壤水分的大量损失, 在蒸散发作用下, 水分此时以向上运输为主, 同时将深层土壤的盐分带到浅层土

壤, 并不断进行积累, 该阶段内土壤水分整体变化较缓, 故其引起的积盐速率也就相对稍慢。

同时, 具体二维空间范围内土壤水盐的变化特点也具有一定的规律性。水平空间上, 距滴头方向越近, 土壤平均含水量随时间变化越快, 幅度也越大, 而平均含盐量的表现恰与之相反, 距离远的随时间变化较快, 且幅度较大; 垂直空间上, 0~40 cm土层内的平均含水量随时间变化较其余土层范围的明显得多, 其中尤以表土层的变化最为显著, 同时表土层的平均含盐量变化也最为明显, 10~20 cm土层内的次之, 其余空间处的变化则很小。这主要与灌溉, 蒸发等因素有关。由于灌溉的咸水是以滴头为中心逐步向四周渗透扩散的, 且在传输过程中不断衰减, 使得距滴头较近空间内的水分含量较高, 故在蒸发和入渗等作用下, 其水分变化较剧烈, 散失程度也较严重; 在距离较远的空间内, 由于土壤蓄水性较差, 在灌水和蒸发等影响下并不能很好地截留水分而维持了相对平稳的水分变化状态。同时, 距滴头较远的水平空间内, 前期因灌溉作用为主导的水分变化引起的整体盐分淋洗较明

显,而后期因蒸发作用为主导的水分变化引起的整体盐分积累较明显,故整个灌水周期内的盐分变化较明显;距滴头较近的垂直空间内,较浅土层受蒸

发和灌水影响较为显著,由此引起的水盐含量变化也相对较明显,其中尤以表土层为最。

经模型拟合与验证(表4),在灌水周期内,

表4 灌水周期内(1~15 d)二维空间土壤水盐时间变化数学模拟

Table 4 Mathematic models for temporal variation of the bi-dimensional dynamics of soil water and salt during the irrigation periods

二维空间		土壤水分 Soil water					土壤盐分 Soil salt				
Two-dimensional Space		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>	模型 Model	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>
水平距离	15	13.31	0.433	0.989	271.3**	$y=at^{-b}$	-0.001	0.017	0.562	0.413	0.703
Horizontal distance (cm)	30	10.32	0.332	0.991	321.4**		0.003	-0.013	1.309	0.858	6.057
	45	6.784	0.163	0.967	88.91**		0.020	-0.330	3.180	0.954	20.92*
	60	4.645	0.020	0.300	1.288		0.014	-0.216	4.002	0.953	20.42*
垂直距离	0	23.02	1.501	0.917	33.13**	$y=at^{-b}$	-1.184	0.086	11.50	0.961	24.66*
Vertical distance (cm)	10	9.735	0.388	0.980	149.4**		0.193	-0.018	2.720	0.798	3.947
	20	15.50	0.424	0.995	580.4**		-0.017	-0.001	0.930	0.483	0.933
	40	10.33	0.250	0.937	44.55**		0.000	-0.001	0.584	0.499	0.994
	60	-0.148	6.599	0.902	27.59*	$y=at+b$	0.004	0.000	0.521	0.020	0.020
	80	0.129	3.679	0.883	22.68*		-0.015	0.001	0.615	0.682	2.143
	100	0.113	3.946	0.892	24.89*		0.034	-0.001	0.471	0.808	4.212
	120	0.101	4.958	0.490	2.881		-0.019	0.001	0.621	0.474	0.901
总体 Overall	平均Mean	8.746	0.270	0.990	284.7**	$y=at^{-b}$	0.009	-0.138	2.269	0.949	18.69*

$$y=at^2+bt+c$$

防护林土壤水分随日变化总体满足幂函数递减规律,其方程为: $y=8.746t^{-0.270}$ ($t=1, 2, 3, \dots$,下同);土壤盐分随日变化总体满足抛物线函数规律,其方程为: $y=0.009t^2-0.138t+2.269$ 。但具体到不同二维空间尺度上,土壤水盐的时间动态又有所相同。具体而言,水平空间上,15、30和45 cm梯度处的日均含水量变化呈幂函数递减规律($y=at^{-b}$),同时45和60 cm梯度处的日均含盐量变化规律符合抛物线模型,而其余处日均水盐含量变化规律用上述方程描述却不显著($p>0.05$);垂直空间上,0~40 cm土层范围内的日均含水量变化均符合幂函数递减规律,而60~120 cm土层范围内的日均含水量变化总体呈一元线性递减规律($y=-at+b$),同时仅有表土层的日均含盐量变化规律可用抛物线函数($y=at^2-bt+c$)表征,其余处的则在该模型水平上不显著($p>0.05$)。

2.2 土壤水盐空间分布特征

土壤水盐水平分布:塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林土壤水盐的二维空间分布特征如图3和图4所示。由图3知,在4~7月份(包括降雨

与非降雨条件)的各试验灌水周期内,土壤水盐在水平空间上具有明显的分布规律。水分方面:15 cm梯度处的平均含水量(7.0%~9.0%)均为最高,极差(约9.0%)也最大;60 cm梯度处的平均含水量(4.0%~7.0%)均为最低,极差(约1.0%)也最小;30和45 cm梯度处的平均含水量(5.0%~8.5%)及其极差(3.0%~6.0%)则居于二者之间。盐分方面:15 cm梯度处的平均含盐量(0.5~1.0 g kg⁻¹)均为最低,极差(约0.3 g kg⁻¹)也最小;60 cm梯度处的平均含盐量(2.5~4.0 g kg⁻¹)均为最高,极差(约1.0 g kg⁻¹)也最大;30和45 cm梯度处的平均含盐量(1.0~3.0 g kg⁻¹)及其极差(0.5~1.5 g kg⁻¹)则居于二者之间。简言之,在水平空间尺度(0~60 cm)上,距离滴头越近,土壤水分含量越高,变动越大,越远则含量越低,变动越小,而盐分的表现恰与之相反。

土壤水盐的上述分布特征除主要取决于受灌溉和蒸发这两个因素影响外,还受梭梭根系空间分布状况的影响。由图5,梭梭的平均毛根重密度随着水平距离的增加而递减,而单位体积的毛根系分

布越多, 吸持的水分越多, 又因距滴头较近的水平空间内的水分供给较多, 加上植株较好的遮阴作用减少了其蒸发量, 故其整体水分含量相对较高。同时, 在距滴头较近的水平空间内, 灌水对盐分的淋洗作用和植株对盐分的吸收作用均较强, 且因为遮

阴的影响, 由蒸发引起的盐分积聚量低于灌水的淋洗量与梭梭植株对盐分的吸收量, 故其整体盐分含量较低; 与之相反, 在距滴头较远的水平空间内, 灌水淋洗和根系吸收的盐分少于蒸发积聚的盐分, 故其整体盐分含量较高。

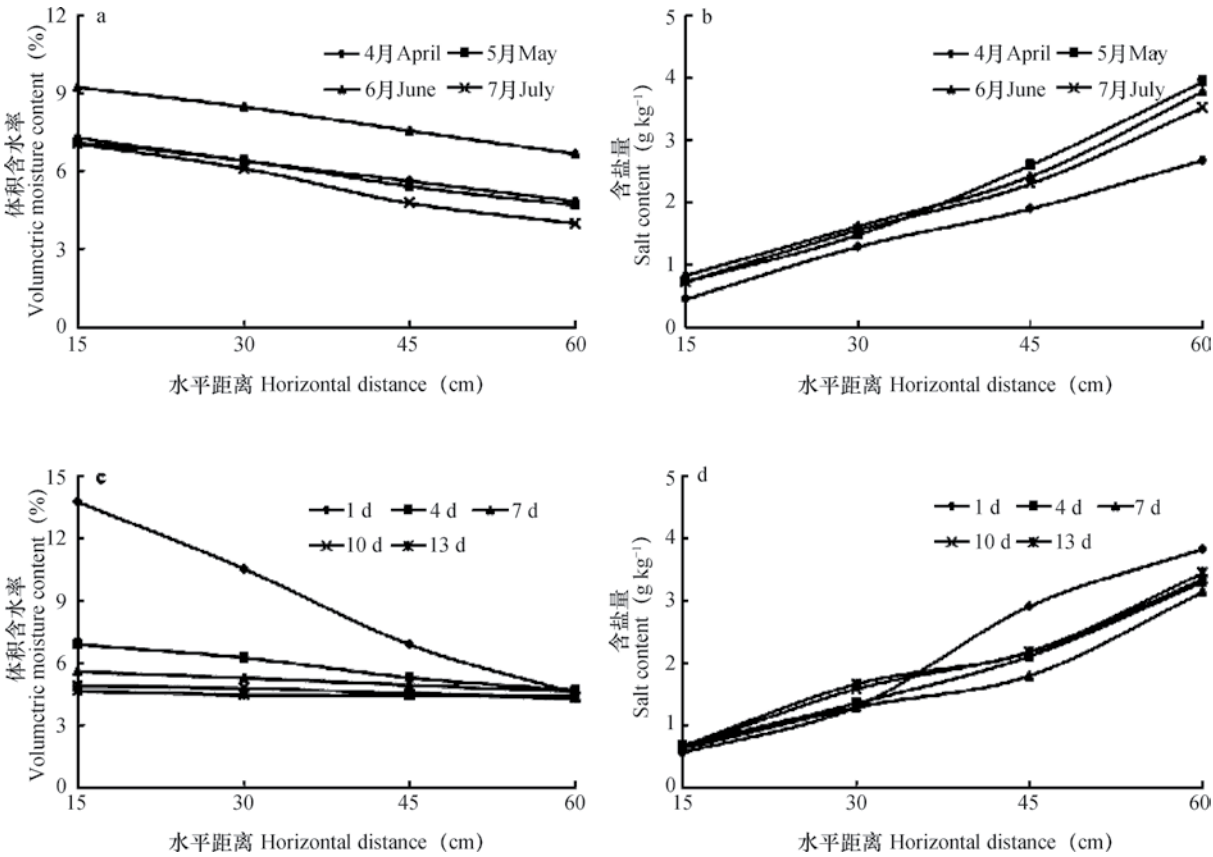


图3 土壤水平(0~60 cm)空间平均水盐分布

Fig. 3 Horizontal distributions of mean soil water and salt contents in the 0~60 cm soil layer

表5 土壤水盐水平(0~60 cm)空间分布规律数学模拟

Table 5 Mathematical models for horizontal distributions of soil water and salt in the 0~60 cm soil layer

时间 Time		土壤水分 Soil water					土壤盐分 Soil salt				
		a	b	R ²	F	模型 Model	a	b	R ²	F	模型 Model
灌水周期期间 Between the irrigation periods	4月 April	0.054	8.068	0.999	1 963**	$y = -ax + b$	0.049	0.258	0.997	571.9**	$y = ax - b$
	5月 May	0.055	7.974	0.995	425.6**		0.072	0.512	0.985	131.4**	
	6月 June	0.058	10.15	0.998	960.7**		0.065	0.264	0.980	95.73**	
	7月 July	0.070	8.106	0.990	203.2**		0.061	0.271	0.987	147.0**	
灌水周期内 During the irrigation period	1 d	0.209	16.77	0.993	281.0**		0.076	0.714	0.980	98.50**	
	4 d	0.051	7.634	0.991	228.1**		0.058	0.305	0.981	101.7**	
	7 d	0.022	5.906	0.999	2 960**		0.054	0.314	0.952	39.31*	
	10 d	0.012	5.083	0.963	51.63*		0.058	0.254	0.986	142.3**	
	13 d	4.717	0.007	0.897	17.51*		0.059	0.234	0.976	81.41*	

此外, 根据表5, 在水平0~60 cm空间范围内, 四个试验灌水周期内的土壤平均水盐含量与水平空间距离之间均满足一元线性函数关系 (p

< 0.05)。其中, 土壤水分呈线性衰减分布 ($y = -ax + b$, $1 \leq x \leq 60$, 下同), 而盐分呈线性递增分布 ($y = ax - b$)。

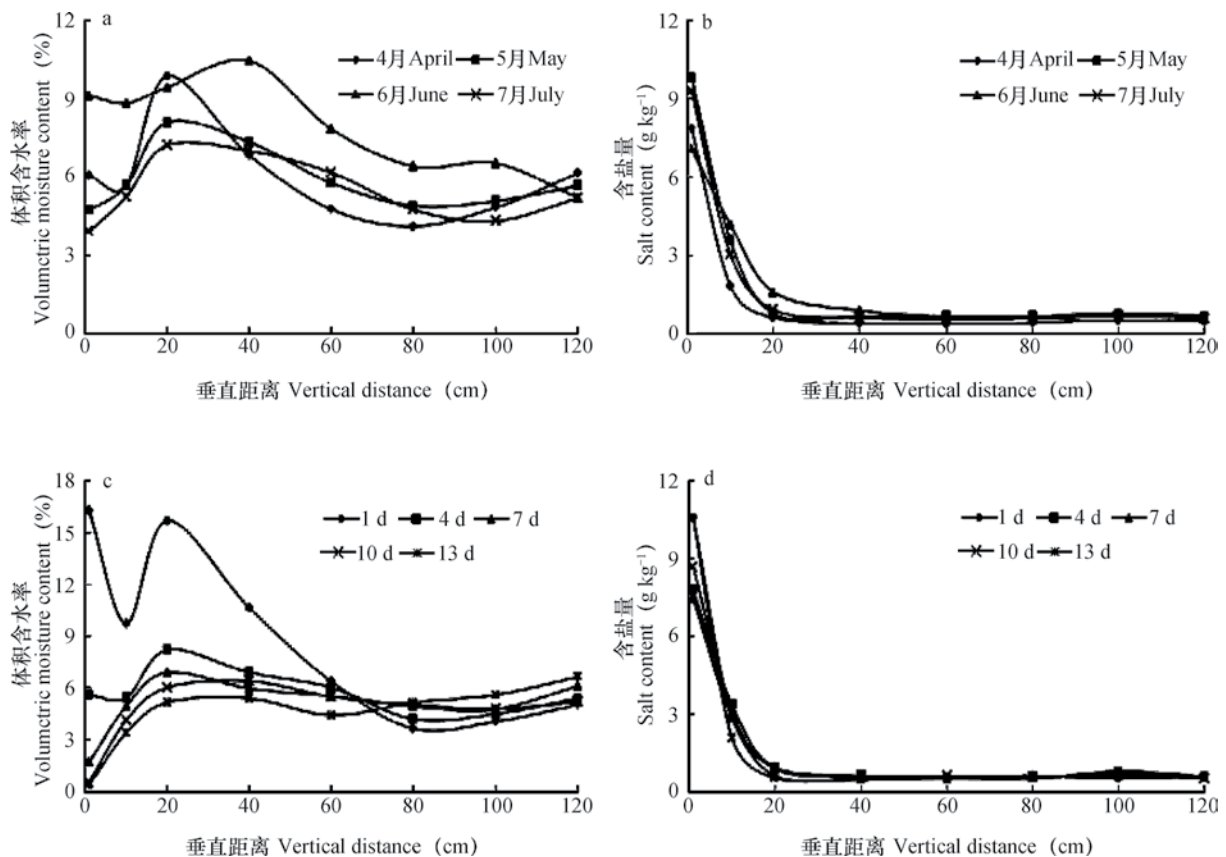


图4 土壤垂直 (0~120 cm) 空间平均水盐分布

Fig. 4 Vertical distributions of mean soil water and salt contents in the soil profile (0~120 cm)

土壤水盐垂直分布: 由图4, 在垂直空间0~120 cm范围内, 绿地4~7月份的各试验灌水周期内的土壤水分均随着土层深度的增加整体表现出“低, 高, 低, 高”的分布特点, 而盐分均呈“上高下低”的分布特点。具体言之, 水分方面: 0~10 cm和60~100 cm土层范围内的平均含水量 (4.0%~9.0%) 相对较少, 但极差 (2.0%~16.0%) 却相对较大, 而20~40 cm范围内和120 cm土层处的平均含水量 (5.0%~11.0%) 相对较多, 但极差 (2.0%~11.0%) 相对较小; 盐分方面: 0~10 cm土层范围内的平均含盐量 ($1.5 \sim 10.0 \text{ g kg}^{-1}$) 相对较高, 极差 ($1.5 \sim 3.0 \text{ g kg}^{-1}$) 也相对较大, 而20~120 cm土层范围内的平均含盐量 ($0.5 \sim 1.0 \text{ g kg}^{-1}$) 相对较低, 极差 ($0 \sim 0.5 \text{ g kg}^{-1}$) 也相对较小。

以上现象除取决于土壤自身空间变异性外, 还

受灌溉、蒸发、根系分布等因素的影响。在0~10 cm土层内, 尽管其在初期得到了大量水分补给, 但由于其水分受蒸发影响散失也最为严重, 且部分水分又向下入渗, 故其整体水分含量相对较低, 而其较大的变化幅度主要是由表土层的水分下降引起的; 其盐分含量在前期受灌水淋洗显著而有明显下降, 而在后期阶段又因蒸发积累显著而有明显上升, 升降幅度均相对较大。根据图5, 梭梭植株的大量根系分布于20~40 cm土层内, 故因根系聚水和吸盐作用而使该处的水分含量相对较高、盐分含量相对较低。此外, 土壤有机质含量很可能是影响盐分垂直分布差异性的一个重要原因, 这是因为相对于其他土层, 表土层的有机质含量很高^[16], 其在一定程度上阻碍了灌水对其盐分的淋洗, 从而发生了明显的积盐现象, 而其他土层范围内的有机质含量很低, 土壤孔隙度较大, 对盐分的截留程度很

轻微，故整体盐分含量普遍较低。

总体上看，土壤水分随土深增加表现为较明显的单峰曲线，且该峰值位于20 cm土层处，均值约为7.5%~10.0%；盐分主要积聚在表土层，均值为7.0~10.0 g kg⁻¹，并在表土层距离滴头45~60 cm

处有及其显著的积盐现象，盐分高达10~20 g kg⁻¹（图2），是所用灌水的约2.5倍~5.0倍；其余根层的平均含盐量约0.5~1.0 g kg⁻¹。同时，由表6，防护林土壤平均含盐量的分布规律可用逆模型进行表征（ $p < 0.01$ ），其函数形式为： $y=a+b/x$ （ $1 \leq x \leq 120$ ）。

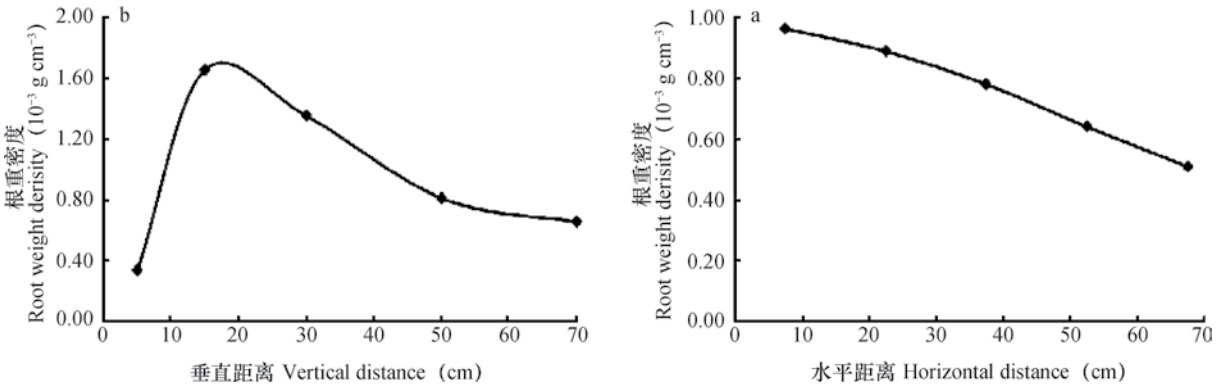


图5 土壤二维空间梭梭平均根重密度分布

Fig. 5 Bi-dimensional spatial distributions of mean root weight density of *Haloxylon ammodendron*

表6 土壤盐分垂直（0~120 cm）空间分布数学模拟

Table 6 Mathematical models for vertical distributions of soil salt in the soil profile (0~120 cm)

	时间 Time	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>	模型 Model
灌水周期间	4月 April	0.397	7.528	0.988	504.9**	$y=a+b/x$
Between the irrigation periods	5月 May	0.781	9.166	0.945	103.0**	
	6月 June	1.111	6.188	0.814	26.21**	
	7月 July	0.687	8.743	0.962	151.0**	
灌水周期内	1 d	0.608	10.081	0.979	274.4**	
During the irrigation period	4 d	0.764	7.161	0.914	63.55**	
	7 d	0.654	6.907	0.935	85.79**	
	10 d	0.696	8.103	0.950	114.2**	
	13 d	0.440	10.119	0.992	746.9**	

3 讨 论

塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林的上述土壤水盐动态特征与规律，是多种因素^[13, 17-25]综合作用的结果。其中，土壤水盐时间变化主要受灌溉、蒸发、气温、降雨和植物蒸腾等环境因素的影响，而其空间分布主要取决于灌溉、蒸发、植被遮阴与根系分布以及土壤空间变异性等。本研究认为：

在干旱荒漠区，土壤水盐含量与植物根系分布密切相关。一方面，防护林土壤水分与梭梭根系的一致性分布规律表明了荒漠植物的根区聚水特征。

杨艳凤等^[19]在古尔班通古特沙漠的研究也发现，梭梭根区存在水分相对丰富的“湿岛”，不同条件下根区的平均含水量均明显大于裸地；其他相关研究^[22-24]也证明了荒漠灌木根区存在水分富集的现象。另一方面，防护林土壤表层（0~10 cm）较少的梭梭根系分布与较高的含盐量以及水平空间上根系与盐分截然相反的分布规律表明，根系分布在一定程度上影响了土壤的含盐量，这主要体现在荒漠盐生植物根系的吸盐功能上。孙聪等^[25]也发现，在咸水淋洗和蒸散等因素的综合影响下，防护林带外缘根系层土壤的盐分有所减少。

土壤表层较高的有机质含量很可能阻碍了水分对盐分的向下淋洗，这在距离滴头较远的空间范围内体现得尤为明显，而咸水的连续滴灌和表层有机质的不断积累共同促使了表土层距滴头45~60 cm处高度积盐现象的发生。但由于其他根层土壤（20~120 cm）范围的平均含盐量（不足1.0 g kg⁻¹）很低，尚未超出植物的盐分承载范围，此即为大多数植物能够在高矿化度咸水灌溉下正常生长的主要原因。这与周智彬等^[8]得出的结果一致。

在干旱荒漠地区，水分是保障植物正常生长与否的关键性因子，防护林沙质土壤的蓄水性较差，在灌溉结束后，土壤水分含量通常维持在10%之下，这有可能制约了有关植物的生长与发育，甚至是造成部分植物萎蔫或死亡，从而不利于防护林的持续性。

此外，土壤盐渍化是防护林后期建设与维护的一个重要性障碍因子，故解决好此问题是实现其持续性的重要方面。周智彬等^[9]在研究了4个观测年份的水盐运动特点后，认为在一定年限内利用咸水灌溉不会造成防护林土壤大面积的积盐。这是由于沙质土壤的孔隙度较大，根系土层不易积累盐分，在灌水和蒸发主导下，其整体含盐量可在短期内维持一个相对平衡状态，并呈现出周期性的波动变化。然而，从长远来看，在连续的灌水和源源不断的盐分输入的影响下，这种相对平衡状态是否能持久保持？此问题有待商榷，需要进行长期的观测与探究后才能回答。而在解答此问题之前，当下的工作应聚焦在：（1）如何在最大限度节约用水、减少盐分向土壤输入的同时，满足沙漠植物的正常用水需求，从而实现地下咸水资源的科学管理与高效利用；（2）如何通过不同植物种类的有效搭配与合理密植，以进一步提高其对土壤水分的利用率和对土壤盐分的吸收率；（3）如何在保证尽可能小的环境与经济成本的前提下，采取一些行之有效的举措来不断提高绿地土壤的水分物理性质，尤其是增强和延缓灌水后浅层土壤水分的保持等。

4 结 论

咸水滴灌条件下，塔克拉玛干沙漠腹地防护林土壤水盐呈现出显著的周期性动态变化规律。土壤水分总体随日变化呈幂函数递减（ $y=8.746t^{-0.270}$ ），并先后经历快速下降期（1~4 d）、缓慢变化期

（4~10 d）和基本稳定期（10~15 d）三个阶段；土壤盐分总体随日变化先减后增，分别处于脱盐（1~7 d）和积盐（7~15 d）两个阶段，其日变化规律符合抛物线函数（ $y=0.009t^2-0.138t+2.269$ ）。

水平空间内，距滴头越近，水分含量越高，变化越剧烈；距滴头越远，盐分含量越高，变化越剧烈。垂直空间内，在距滴头较近范围内，水盐含量相对较高，其变化较为剧烈；反之，水盐含量则较低，变化相对平缓。

水平空间距离上，土壤平均水分呈一元线性递减分布，而盐分则呈一元线性递增分布。垂直空间距离上，水分随土深增加表现为单峰曲线，其峰值位于20 cm土层处，含水量整体较低。土壤平均盐分符合逆函数分布规律。其中，表土层的盐分含量最高，且在表土层距离滴头45~60 cm处有显著的积盐现象，含盐量高达10~20 g kg⁻¹，是灌溉水的2.5倍~5.0倍，而其余土层含盐量很低。

参 考 文 献

- [1] Gries D, Zeng F, Foetzki A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26 (5): 725—736
- [2] Zhou H W, Li S Y, Sun S G, et al. Effects of natural covers on soil evaporation of the shelterbelt along the Tarim Desert Highway. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (S2): 137—145
- [3] 冯起, 司建华, 席海洋. 荒漠绿洲水热过程与生态恢复技术. 北京: 科学出版社, 2009
- [4] Feng Q, Si J H, Xi H Y. Hydrothermal process and ecological recovery technology in the desert oasis (In Chinese). Beijing: Science Press, 2009
- [5] Nish M S, Wierenga P J. Time series analysis of soil moisture and rain along a line transect in arid rangeland. *Soil Science*, 1991, 152: 189—198
- [6] 李丙文. 塔里木沙漠公路防护林咸水灌溉水盐调控机理研究. 北京: 北京林业大学水土保持学院, 2010
- [7] Li B W. Mechanism of water-salt regulation for the shelterbelts with saline water irrigation along the Tarim Desert Highway (In Chinese). Beijing: College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 2010
- [8] 杨红梅, 徐海量, 牛俊勇. 干旱区滴灌条件下防护林次生盐渍化土壤水盐运移规律研究. *土壤学报*, 2010,

- 47 (5): 1023—1027
- Yang H M, Xu H L, Niu J Y. Soil water and salt transport in secondary salinized soil under shelterbelt using drip irrigation in arid zone (in Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (5): 1023—1027
- [7] 周智彬, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水灌溉下塔里木沙漠公路防护林水分平衡研究. *干旱区地理*, 2010, 33 (6): 904—908
- Zhou Z B, Xu X W, Lei J Q, et al. Water balance and movement of Tarim Desert Highway Shelterbelt irrigated by saline water (in Chinese). *Arid Land Geography*, 2010, 33 (6): 904—908
- [8] 周智彬, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水灌溉下塔里木沙漠公路防护林盐分平衡及盐分运移. *干旱区地理*, 2006, 29 (4): 470—475
- Zhou Z B, Xu X W, Lei J Q, et al. Salt balance and movement of Tarim Desert Highway Shelterbelt irrigated by saline water (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2006, 29 (4): 470—475
- [9] 周智彬, 徐新文, 李丙文. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地水盐动态的研究. *干旱区研究*, 2000, 17 (1): 21—26
- Zhou Z B, Xu X W, Li B W. Study on trends of water and salt of artificial greenbelt in Hinterland of Taklimakan Desert (in Chinese). *Arid Zone Research*, 2000, 17 (1): 21—26
- [10] 黄强, 李生秀, 宋郁东. 咸水灌溉沙地后的水盐运移规律. *土壤学报*, 2003, 40 (4): 547—553
- Huang Q, Li S X, Song Y D. The movement of water and salt in sandy land after irrigated with saline water (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (4): 547—553
- [11] 闫冰, 周智彬, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林带土壤入渗研究. *水土保持学报*, 2012, 26 (4): 98—103
- Yan B, Zhou Z B, Lei J Q, et al. Studies on soil infiltration of shelter forest along Tarim Desert highway (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (4): 98—103
- [12] 李雪, 李国敏, 王志民, 等. 塔里木沙漠公路沿线不同地下水埋深下的土壤水盐分布特征. *干旱区地理*, 2013, 36 (3): 393—399
- Li X, Li G M, Wang Z M, et al. Soil water and salt with different water table depths along the Tarim Desert Highway (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2013, 36 (3): 393—399
- [13] 周智彬, 李培军, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地对沙地盐分时空分布的影响. *水土保持学报*, 2002, 16 (2): 16—19
- Zhou Z B, Li P J, Xu X W, et al. Effect of artificial green belt on salt distribution in sand land in hinterland of Taklimakan Desert (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16 (2): 16—19
- [14] 王永东, 徐新文, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路生态防护林沿线土壤表层盐分特征. *干旱区研究*, 2010, 27 (7): 51—56
- Wang Y D, Xu X W, Lei J Q, et al. Analysis on properties of topsoil salinity along the shelterbelts of the Tarim Desert Highway (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2010, 27 (7): 51—56
- [15] 王永东, 李生字, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林咸水灌溉土壤盐渍化状况研究. *土壤学报*, 2012, 49 (5): 886—891
- Wang Y D, Li S Y, Xu X W, et al. Soil salinization of the windbreak forest belts irrigated with saline water alongside the Tarim Desert Highway (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (5): 886—891
- [16] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水滴灌下沙漠公路防护林土壤理化性质的变化. *中国生态农业学报*, 2009, 17 (4): 667—672
- Zhang J G, Xu X W, Lei J Q, et al. Change in soil physical and chemical property in the Tarim Desert highway shelterbelt under saline water drip irrigation (in Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17 (4): 667—672
- [17] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征. *生态学报*, 2010, 30 (15): 4035—4045
- Ma X D, Li W H, Zhu C G, et al. Spatio temporal variation in soil moisture and vegetation along the lower reaches of Tarim River, China (In Chinese). *Acta Ecological Sinica*, 2010, 30 (15): 4035—4045
- [18] Thomas F M, Foetzki A, Arndt S K, et al. Water use by perennial plants in the transition zone between river oasis and desert in NW China. *Basic and Applied Ecology*, 2006, 7: 253—267
- [19] 杨艳凤, 周宏飞, 徐利岗. 古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征. *应用生态学报*, 2011, 22 (7): 1711—1716
- Yang Y F, Zhou H F, Xu L G. Dynamic variations of soil moisture in *Haloxylon ammodendron* root zone in Gurbantunggut Desert (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (7): 1711—1716
- [20] 刘健, 贺晓, 包海龙, 等. 毛乌素沙地沙柳细根分布规律及与土壤水分分布的关系. *中国沙漠*, 2010, 30 (6): 1362—1366
- Liu J, He X, Bao H L, et al. Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil

- moisture in Mu Us Sandland (in Chinese) . Journal of Desert Research, 2010, 30 (6) : 1362—1366
- [21] 史志华, 朱华德, 陈佳, 等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2012, 23 (4) : 889—895
- Shi Z H, Zhu H D, Chen J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and its relationships with environmental factors at small catchment level (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (4) : 889—895
- [22] Li J, Zhao C Y, Song Y J, et al. Spatial patterns of desert annuals in relation to shrub effects on soil moisture. Journal of Vegetation Science, 2010, 21: 221—232
- [23] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Stem flow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1501—1507
- [24] Wang X P, Cui Y, Pan Y X, et al. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems. Journal of Hydrology, 2008, 358: 134—143
- [25] 孙聪, 徐新文, 范敬龙, 等. 咸水灌溉对塔里木沙漠公路防护林外缘土壤水盐环境的影响. 水土保持通报, 2010, 30 (6) : 91—95
- Sun C, Xu X W, Fan J L, et al. Impacts of saline water irrigation on soil water-salt environment of outer edge of Tarim Desert Highway (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30 (6) : 91—95

Dynamics of Soil Water and Salt in Soil under Artificial Plantation Shelterbelt Drip-irrigated with Saline Water in the Center of the Taklimakan Desert

DING Xinyuan^{1, 2, 3} ZHOU Zhibin^{1†} XU Xinwen¹ WANG Yongdong¹ JIANG Yuan³

LU Jingjing^{1, 2} CHANG Qing¹

(1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Soil water, as the major component of water in desert ecosystems, is the most important environmental factor which limits the growth and productivity of the vegetation. Specifically, soil water plays a significant role in the development, evolution and productivity of sand soils, as well as in maintaining the structure stability and function of desert ecosystems. Besides, it can make a great difference on the windbreak and sand-fixation, etc. The Tarim Desert Highway, crossing the Taklimakan desert, is protected by the artificial plantation shelterbelts along the highway. Due to high evaporation demand and extremely low rainfall in this region, it is very difficult to maintain the water balance of the sandy soil along the plantation shelter, thus leading to failure in meeting the normal water demand of plants without irrigation. Consequently, how to meet the water demand of plants is the key problem to sustain the plantation shelterbelt. Currently, pumped saline groundwater has been utilized to supplement the soil water loss in the shelterbelt. However, the soil salinization, caused by the long-term saline water (especially the saline water of high salinity) irrigation, inevitably hampers the construction and maintenance of the plantation shelterbelt. Solution for this problem is highly dependent on the understanding of the soil water and salt dynamics. Based on these, it is very necessary to carry out the dynamics of the soil water and salt in this region, and so on. In order to reveal the laws of spatial and temporal dynamics of the soil water and salt in the soil under artificial shelterbelt drip-irrigated with saline water in the center of the Taklimakan Desert, a field study was carried out to monitor temporal variation and two-dimensional spatial distribution of soil water and salt in the soil between April and July during which four irrigation events occurred at the interval of 15 days. Results show that (1) in the soil

under artificial shelterbelt drip-irrigated with saline water, dynamics of the soil water and salt displayed an obvious periodic rule, that is, within an irrigation cycle (15 days), soil water dropped rapidly in content during the first period from D1 to D4, slowed down in changing during the second period from D4 to D10 and leveled off during the third period from D10 to D15, and the variation as a whole fitted the law of diminishing power function ($y=8.746t^{-0.270}$, $t=1, 2, 3\cdots$), while soil salt was being leached out in the first 7 days and then accumulating in the following 8 days (7 ~ 15 d), and the variation as a whole fitted the equation of Parabolic Function ($y=0.009t^2-0.138t+2.269$, $t=1, 2, 3\cdots$); and (2) in the 0 ~ 60 cm soil layer, soil water displayed a monistic linear diminishing pattern in horizontal distribution, while soil salt, a monistic linear increasing pattern; and in the 0 ~ 120 cm soil profile, the distribution of soil water displayed a single-peak curve with the peak appearing at 20 cm in soil depth, while the distribution of soil salt fitted the inverse function model, and salt accumulated in the surface of soil (0 ~ 5 cm) forming a circle around the nozzle 45 ~ 60 cm in radius, where the salt content might reach as high as 10 ~ 20 g kg⁻¹. Our results suggest that the dynamics of soil water and salt in the artificial plantation shelterbelts, affected by varying environmental factors such as irrigation, evaporation, air temperature, precipitation, vegetation, as well as the spatial variability of the soil properties, exhibit both generality and differentiation, regardless of spatio-temporal scales. Thus our study may provide theoretical basis for predicting dynamics of the soil water and salt, evaluating soil salinization and further optimizing the present irrigation regime for the artificial plantation shelterbelts in this region.

Key words Saline water drip-irrigation; Dynamics of water and salt; Artificial plantation shelterbelt; Taklimakan Desert

(责任编辑: 汪枞生)