

# 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\*

陈永宝<sup>1,2</sup> 胡顺军<sup>1†</sup> 罗毅<sup>1,2</sup> 田长彦<sup>1</sup> 尹传华<sup>1</sup>

(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)

**摘要** 为了研究新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的定量关系, 对试验区自然状况下的土壤含水量、表层土壤含盐量、地下水埋深、地下水矿化度和潜水蒸发量进行了原位监测, 模拟了潜水蒸发量与地下水埋深的关系, 定量分析了弃荒地自然条件下地下水埋深、地下水矿化度对土壤表层盐分的影响, 建立了表层土壤含盐量与地下水埋深、地下水矿化度的经验模型。结果表明: 在 5~50 cm 土层, 土壤质量含水率随土层深度增加而增大; 地下水埋深、地下水矿化度对表层土壤盐分有显著的影响, 当地下水埋深为定值时, 表层土壤含盐量与地下水矿化度呈线性正相关; 当地下水矿化度为定值时, 表层土壤含盐量与地下水埋深呈线性负相关; 土壤盐分表聚现象明显, 不同地下水埋深条件下表层土壤含盐量随累计潜水蒸发量的增加而增大, 表层土壤积盐速率随地下水埋深的增大而减小, 地下水埋深为 25 cm 条件下表层土壤积盐速率约是地下水埋深为 50 cm 的表层土壤积盐速率的 2 倍多。

**关键词** 土壤盐分; 地下水埋深; 地下水矿化度; 潜水蒸发

**中图分类号** S156.4 **文献标识码** A

受干旱气候条件和地质背景控制, 干旱地区的灌区始终存在着土壤次生盐渍化的风险<sup>[1]</sup>。此外, 已治理好的耕地由于水土资源开发不当和灌溉排水管理不善, 也可能返盐, 盐渍土治理具有反复性和不稳定性。不同矿化度的地下水通过土体毛管作用而蒸发损失, 将所携带的水溶性盐累积于土体中, 特别是累积于表层土壤中, 则是土壤现代盐分累积过程最基本和普遍的形式<sup>[2]</sup>。在地下水浅埋区, 土壤盐渍化的盐分绝大部分来自于地下水<sup>[3]</sup>, 其积盐量与地下水蒸发量大小密切相关<sup>[4]</sup>。由于地下水浅埋区的蒸发量较大, 水分强烈向上运移, 不仅使地下水中盐分易浓缩, 而且加剧了表部土壤的积盐量<sup>[5]</sup>。因此, 研究土壤盐分与地下水的关系, 对地下水浅埋区的盐碱地改良和土壤次生盐碱化防治具有重要理论价值和实际意义。

目前, 国内外学者对土壤盐分与地下水的关系进行了大量研究, 取得了不少成果。Salama 等<sup>[6]</sup>认

为地下水是影响盐分迁移、积累和释放的主要因素。Ceuppens 和 Wopereis<sup>[7]</sup>认为地下水埋深浅, 矿化度高, 则易于盐分在毛管作用下向上迁移。Qadir 等<sup>[8]</sup>认为在地下水浅埋区, 盐分难以排出时易形成咸水渍害。Mahmood 等<sup>[9]</sup>认为地下水水位上升通常导致土壤盐渍化, 加速土壤退化。姜溥礼和高志远<sup>[10]</sup>研究了灌区土壤盐分与地下水动态的关系, 分析了灌区土壤次生盐碱化发生的地下水条件, 提出了保证作物丰产和防止次生盐碱化的地下水控制标准、控制制度和以灌溉、排涝为中心环节的综合防止措施。贾大林和傅正泉<sup>[11]</sup>曾进行室内土壤模拟实验, 证明在淡地下水蒸发运移过程中, 可以将下层土体盐分溶解向上运动而聚集于表土。石元春等<sup>[12]</sup>进行了蒸发条件下黏土层与土壤水盐运移研究。尤文瑞等<sup>[13]</sup>采用室内模拟实验证明, 在土壤中原始平均含盐量为 0.49 g kg<sup>-1</sup>的情况下, 当用蒸馏水模拟地下水而进行蒸发试验仍能使表土发

\* 农业部公益性科研专项课题(200903001-4)、国家科技支撑计划课题(2009BAC54B02)资助

† 通讯作者: 胡顺军(1968—), 男, 陕西勉县人, 研究员, 主要从事干旱区生态水文、节水灌溉等方面的研究。E-mail: xjhshunjun@yahoo.com.cn

作者简介: 陈永宝(1987—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail: cyb200705356@126.com

收稿日期: 2013-03-29; 收到修改稿日期: 2013-10-22

生盐渍化。孟繁华等<sup>[14]</sup>进行了蒸发条件下非饱和黏土水盐动态研究。欧阳丽等<sup>[15]</sup>进行了蒸发条件下有黏土夹层粉砂壤土水盐动态研究。刘福汉和王遵亲<sup>[16]</sup>进行了潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动研究。彭望球等<sup>[17]</sup>研究了地下水埋深、地下水矿化度和地貌因子对土壤盐碱化的影响。刘广明等<sup>[4,18-19]</sup>系统地研究了土壤盐分与地下水埋深、地下水矿化度、潜水蒸发的关系,潜水蒸发与地下水埋深、地下水矿化度的关系。姚荣江和杨劲松<sup>[20]</sup>研究发现,耕层土壤盐分与地下水埋深呈负相关,与地下水矿化度呈极显著的相关关系,且地下水埋深增加使其相关性减弱。杨劲松等<sup>[21]</sup>研究了新疆塔里木灌区 0~50 cm 土壤积盐速率与地下水埋深关系。郭全恩等<sup>[22]</sup>采用室内土柱模拟试验研究了不同地下水埋深的蒸馏水对土体盐分离子作用规律的影响。孙博等<sup>[23]</sup>利用自制的试验装置,通过对蓄水水位高低的循环变化,模拟研究了水体与土壤之间盐分运移关系。

本文在前人试验研究的基础上,原位监测了新疆喀什地区地下水浅埋条件下的土壤水盐动态,试

验模拟了潜水蒸发量与地下水埋深的关系,分析了弃荒地自然条件下地下水埋深、地下水矿化度对土壤表层盐分的影响,研究结果可为极度干旱区的盐碱地改良和防止耕地返盐提供科学理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆塔什库尔干县塔吉克阿巴提镇境内,地理位置为北纬 38°58'~39°04',东经 77°14'~77°19',平均海拔 1 178 m,距南疆重镇喀什市 132 km。该镇属温带大陆性干旱气候,降水稀少,蒸发强烈,年平均气温 11.7 °C,极端最低气温 -24.4 °C,极端最高气温 49.1 °C,年平均降雨量 52.5 mm,年平均蒸发量 2 584 mm,日照时数达 2 450~3 000 h,无霜期 245 d。试验区地下水埋深较浅,变化在 20~60 cm 之间,地下水矿化度变化在 30~140 g L<sup>-1</sup>之间。土壤的物理性质见表 1,化学性质见表 2。

表 1 土壤的机械组成和土壤水分常数

Table 1 Soil mechanical composition and soil water constant

砂粒 Sand (%) (2~0.05mm)	粉粒 Silt (%) (0.05~0.002mm)	黏粒 Clay (%) (<0.002mm)	土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	饱和含水率 Saturated water content (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm d <sup>-1</sup> )
73.15	24.05	2.80	壤砂土 Loamy sand	1.48	0.40	660.0

表 2 土壤的化学性质

Table 2 Chemical properties of the soil

土壤离子组成 Ionic composition of soil (cmol kg <sup>-1</sup> )								盐渍土类型 Type of saline soil
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	硫酸盐-氯化物盐土
0	0.034	66.6	38.2	6.99	4.13	28.5	125.4	Sulphate-chloride salt soil

### 1.2 试验设计

土壤水盐监测试验:试验点设在新疆塔什库尔干县塔吉克阿巴提镇两排水渠之间的弃荒地内。排水渠间距 245 m,垂直排水渠打一排地下水观测井,编号为 1 #、2 #、3 #、4 #和 5 #,2012 年 5 月 20 日至 2012 年 11 月 1 日每 7 天观测一次地下水埋深和地下水矿化度。在地下水观测井左侧 50 cm 处设有边长为 1.5 m 的正方形土壤水分和盐分观测小区,编号为 1 S、2 S、3 S、4 S 和 5 S。2012 年 8 月 1 日去除盐分观测小区已形成的表层土壤盐结皮,并浇灌

10 L 自来水压盐,确保各观测小区 0~10 cm 土壤盐分基本接近。从 2012 年 8 月 11 日至 2012 年 9 月 10 日,每 5 天用土钻人工取土,测定距地表 2 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 土壤含水率和含盐量,7 次实测数据的均值作为试验期间的土壤水分和盐分的平均值。试验点布置如图 1 所示。

蒸渗仪表层土壤积盐控制试验:采用自行设计的简易蒸渗仪,同步对该区壤砂土的不同地下水埋深条件下的表层土壤(0~10 cm)积盐进行了模拟试验。

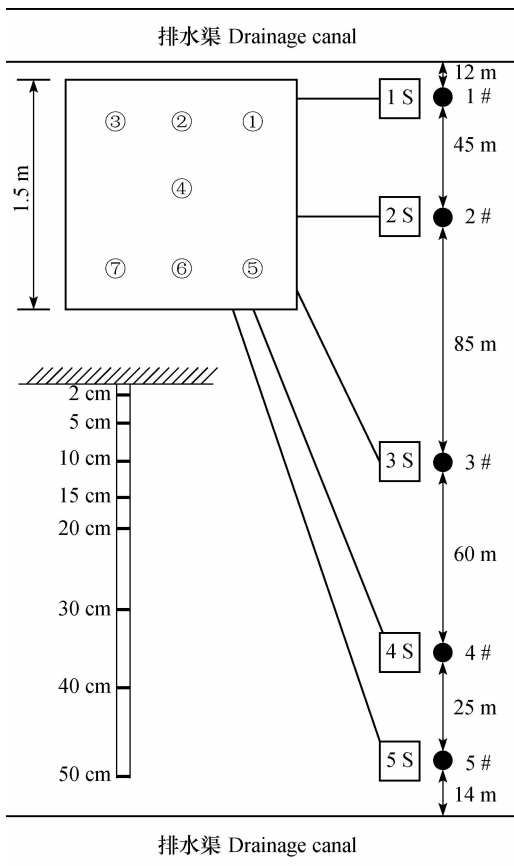


图1 土壤水盐和地下水观测布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of the soil water/salt and groundwater monitoring posts

壤砂土的机械组成如表1所示,土壤初始含盐量为  $2.336 \text{ g kg}^{-1}$ 。简易蒸渗仪为圆底(聚乙烯塑料),截面积  $3000 \text{ cm}^2$ 。根据研究区地下水埋深范围,潜水埋深设有  $0 \text{ cm}$ 、 $10 \text{ cm}$ 、 $25 \text{ cm}$ 、 $50 \text{ cm}$  及  $75 \text{ cm}$  5个不同的处理,采用马氏瓶供水,观测时间为2012年8月11日至2012年9月10日每晚北京时间20点,每次供水的矿化度约  $3.0 \text{ g L}^{-1}$ ,并于11月10日测量简易蒸渗仪壤砂土  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土壤含盐量。

### 1.3 分析方法

土壤含水率:采用烘干法测定;土壤含盐量和地下水矿化度:采用电导法测定其电导率值,然后参照文献[24]标定方法,计算出土壤含盐量和地下水矿化度;土壤容重:采用环刀法测定;机械组成:由中国科学院新疆生态与地理研究所粒径分析实验室测定,采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)法测定;盐离子:土壤水溶性盐中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  采用双指示剂滴定法,  $\text{Cl}^-$  采用硝酸银滴定法,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  采用EDTA容量法,离子  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  采用火焰光度法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地下水埋深和矿化度随时间的变化

图2和图3分别描述了地下水埋深和地下水矿化度随时间的变化过程。由图2和图3可知,地下水埋深和地下水矿化度在试验研究期间变化明显。5个观测点的地下水埋深变化在  $22.2 \sim 57.4 \text{ cm}$  之间,且每个测点地下水水位大致有相同的变化趋势。测点1到测点5的地下水埋深依次增加,各个测点在试验期间各自的变幅(地下水的最大埋深与最小埋深之差)分别为  $6.4$ 、 $7.7$ 、 $9.1$ 、 $9.3$  和  $10.1 \text{ cm}$ 。地下水矿化度变化在  $30 \sim 140 \text{ g L}^{-1}$  之间,测点1到测点5在试验期间最大地下水矿化度变幅分别为  $11.71$ 、 $26.09$ 、 $9.15$ 、 $9.49$  和  $11.15 \text{ g L}^{-1}$ 。

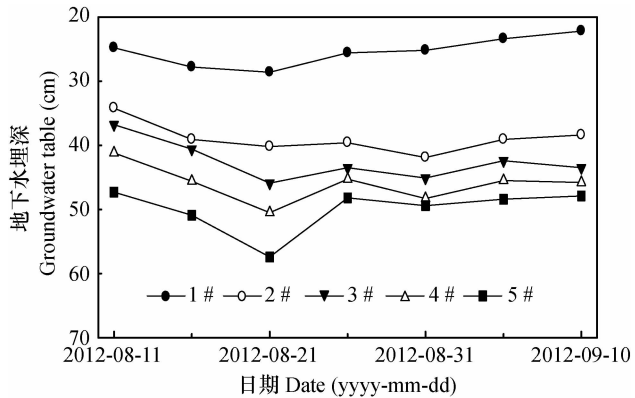


图2 地下水埋深动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of groundwater table

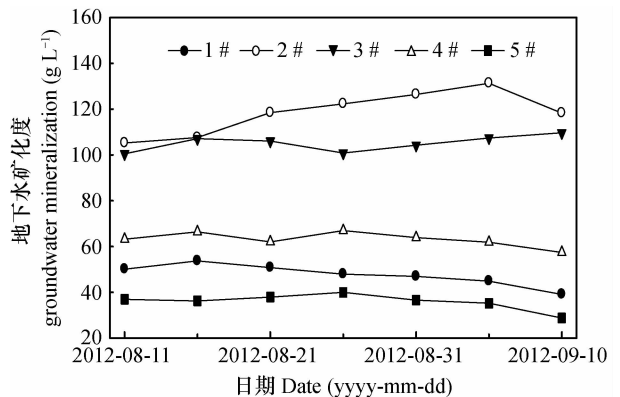


图3 地下水矿化度动态变化

Fig. 3 Dynamic variation of groundwater mineralization

### 2.2 土壤水分和盐分随土层深度的分布

土壤质量含水率随土层深度增加而减小(见图4)。表层土壤含水率较高,在  $5 \text{ cm}$  处土壤含水率达到最小值,这可能是由于土壤表层富集了吸湿性强

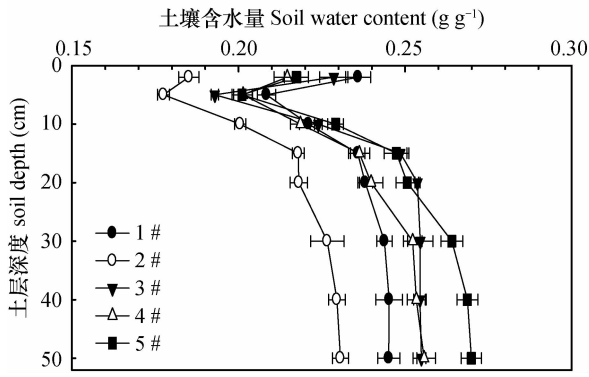


图 4 土壤质量含水率垂直分布

Fig. 4 Distribution of soil water contents in soil profile

的盐分 NaCl 等(见表 2),吸收了邻近土壤的水分的缘故<sup>[25]</sup>。在 5 ~ 50 cm 土层,土壤质量含水率随土层深度增加而增大,这符合浅地下水潜水埋深和蒸发条件下均质土土壤水分分布的一般规律<sup>[26-27]</sup>。

地下水沿毛细管上升,在潜水面之上形成一个毛细水带。当潜水埋深较浅时,毛细水带上缘离地面较近,大气相对湿度较低时,毛细弯月面上的水可由液态变为气态,逸入大气。潜水则源源不断地通过毛细作用上升,不断参与蒸发。由图 4 还可以看出,土壤表层的土壤含水量较高,说明该地地下水埋深较小,土壤表层土壤含水量受到大气蒸发力和毛管支持水的双重作用。

图 5 描述了土壤含盐量随土层深度的分布。由图 5 可知,0 ~ 5 cm 土壤含盐量较高,土壤盐分表聚现象明显,5 cm 以下土壤含盐量较低且变化较小。0 ~ 5 cm 的土壤含盐量是 5 cm 以下土壤含盐量的 1.53 倍 ~ 3.79 倍,0 ~ 5 cm 土壤贮盐量占 0 ~ 50 cm 土壤贮盐量的 29.4% ~ 46.3%。这是因为在强烈的大气蒸发能力作用下,深层土壤和地下水水中的

盐分被带到土壤表层。从图 5 中还可以得出,观测点 1 和 5 距离排水渠最近,观测点 2、3、4 距离排水渠较远,观测点 1 和 5 的土壤含盐量明显低于观测点 2、3、4 的土壤含盐量,这说明排水渠具有明显的排盐效果。

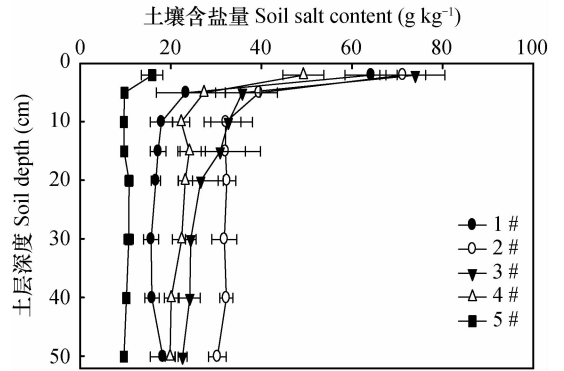


图 5 土壤盐分垂直分布

Fig. 5 Distribution of soil salinity contents in soil profile

以 8 月 11 日的表层土壤盐分作为各自测点的土壤盐分本底值,不同测点在试验期间的土壤盐分增量有较大差异。在 8 月 12 日、8 月 13 日、8 月 20 日和 9 月 2 日共有四次降雨,降雨量依次为 2.3、3.67、1.1 和 3.0 mm,由于降雨的淋溶作用,造成了 8 月 21 日和 9 月 5 日表层土壤盐分降低,在每次降雨之后,土壤含水量增大,气温上升,蒸发加强,造成表层土壤盐分含量增大,所以,每个测点在试验期间均有积盐和脱盐的阶段。但相对于土壤盐分初始值,测点 1、测点 2 和测点 3 呈现积盐现象,测点 4 和测点 5 有脱盐趋势,如图 6 所示。测点 3 积盐效果最为显著,最高积盐速率达 4.19 g kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。测点 1、测点 2 最高积盐速率分别为 2.37、1.31 g kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>,测点 4 和测点 5 最高脱盐速率分别为 1.35、1.20 g kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。

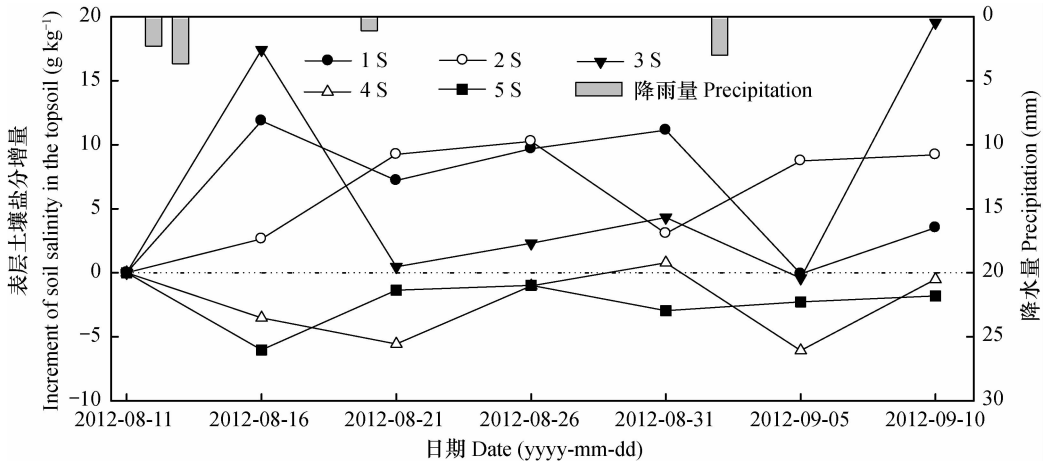


图 6 土壤表层盐分变化

Fig. 6 Dynamic of surface soil salinity

## 2.3 地下水埋深、地下水矿化度对表层土壤积盐的影响

由于各个观测井之间间距大于 25 m,2012 年 5 月 20 日至 2012 年 11 月 1 日观测的地下水埋深和地下水矿化度实测数据显示,各个观测井间地下水埋深和矿化度差异显著(图 2,图 3),相互之间的影响不显著,各个观测井间水力联系较弱。为了揭示表层土壤积盐状况同潜水埋深和地下水矿化度关系,建立以下拟合模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (1)$$

式中, $y$  为表层 0~10 cm 土壤含盐量( $\text{g kg}^{-1}$ ), $x_1$  为地下水矿化度( $\text{g L}^{-1}$ ), $x_2$  为地下水埋深(cm), $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为待定参数。

经拟合得  $\beta_0 = 17.8646$ ,  $\beta_1 = 0.2677$ ,  $\beta_2 = -0.2378$ 。统计特征值如表 3 所示,决定系数  $R^2 = 0.714$ ,拟合效果较好; $F = 37.358 > F_{0.05}(2, 29) = 3.328$ ,回归方程有意义; $t_{0.05/2}(29) = 2.05$ ,系数  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  对应的  $t$  统计特征值分别为 3.049、2.117、8.435,均大于临界值  $t_{0.05/2}(29) = 2.05$ ,说明自变量“地下水埋深”、“地下水矿化度”分别对因变量“表层土壤盐分”有显著的影响。从回归系数的实际意义看,变量  $x_1$  的偏回归系数为正数,表示当地下水埋深  $x_2$  为定值时,表层土壤含盐量与地下水矿化度呈线性正相关;变量  $x_2$  的偏回归系数为负值,表示当地下水矿化度  $x_1$  为定值时,表层土壤含盐量与地下水埋深呈线性负相关; $x_1$  和  $x_2$  对应的系数绝对值相差不大,地下水埋深和矿化度对表层土壤盐分的敏感性一致。

表 3 模型拟合统计特征值

Table 3 Model fitting statistic eigen values

决定系数 $R^2$	$F$ 值	$t$ 值 $t$ value		
Coefficient $R^2$	$F$ value	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
0.845	37.358	3.049	2.117	8.435

将简易蒸渗仪的地下水埋深和矿化度数据代入式(1),计算出表层土壤(0~10 cm)含盐量,与实测的土壤含盐量进行比较后发现:地下水埋深等于 10 cm、25 cm 和 50 cm 的表层土壤盐分计算值与实测值偏差小于 15%,说明式(1)适用于地下水埋深变化在 10~50 cm 的情况。

## 2.4 潜水蒸发对表层土壤积盐的影响

图 7 描述了不同地下水埋深条件下表层土壤含盐量与累计潜水蒸发量的关系。由图 7 可知,不同地下水埋深条件下表层土壤盐分含量随累积潜

蒸发量的增加而增大,表现为正相关。直线斜率的大小代表表层土壤积盐速率的快慢:地下水埋深为 25 cm 条件下表层土壤积盐速率约为地下水埋深为 50 cm 的表层土壤积盐速率的 2 倍多。这一研究结果可为地下水浅埋区盐渍化农田改良提供有意义的指导。

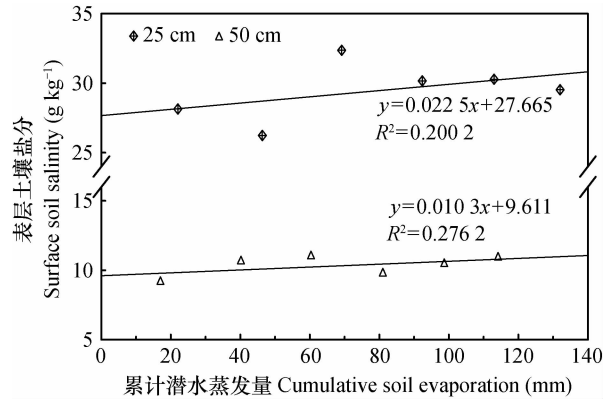


图 7 累计潜水蒸发量与表层土壤盐分的对应关系

Fig. 7 Relationship between cumulative quantity of phreatic evaporation and soil salinity

## 3 结论

在 0~5 cm 土层,土壤质量含水率随土层深度增加而减小;在 5~50 cm 土层,土壤质量含水率随土层深度增加而增大。0~5 cm 土壤含盐量较高,土壤盐分表聚现象明显,5 cm 以下土壤含盐量较低且变化较小。地下水埋深、地下水矿化度对表层土壤盐分有显著的影响,当地下水埋深为定值时,表层土壤含盐量与地下水矿化度呈线性正相关;当地下水矿化度为定值时,表层土壤含盐量与地下水埋深呈线性负相关。不同地下水埋深条件下表层土壤盐分含量随累计潜水蒸发量的增加而增大,表层土壤积盐速率随地下水埋深的增大而减小,地下水埋深为 25 cm 条件下表层土壤积盐速率约是地下水埋深为 50 cm 的表层土壤积盐速率的 2 倍多。

## 参考文献

- [1] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土. 北京:科学出版社,1993. Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993
- [2] 陈小兵,杨劲松,刘春卿. 新疆阿拉尔灌区土壤次生盐碱化防治及其相关问题研究. 干旱区资源与环境,2007,21(6): 168—172. Chen X B, Yang J S, Liu C Q. Study on soil secondary salinization and related issues in Alar Irrigation Area, Xinjiang (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Envi-

- ronment, 2007, 21(6): 168—172
- [3] 张德强, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水浅埋区土壤水的矿化度变化规律及其影响因素浅析. 水文地质工程地质, 2004(1): 52—56. Zhang D Q, Shao J L, Li C J, et al. Study on the variation and influence factor of soil-water mineral degree in shallow groundwater areas (In Chinese). Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(1): 52—56
- [4] 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系. 土壤学报, 2002, 39(3): 384—389. Liu G M, Yang J S, Li D S. Evaporation regularity and its relationship with soil salt (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 384—389
- [5] 崔亚莉, 张德强, 邵景力, 等. 地下水浅埋区土壤水 TDS 变化规律分析. 水土保持学报, 2004, 18(1): 185—188. Cui Y L, Zhang D Q, Shao J L, et al. Study on variation and influence factor of soil-water TDS in shallow groundwater areas (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 185—188
- [6] Salama R B, Otto C J, Fitzpatrick R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 46—64
- [7] Ceuppens J, Wopereis M C S. Impact of non-drained irrigated rice cropping on soil salinization in the Senegal River Delta. Geoderma, 1999, 92: 125—140
- [8] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: A review. Land Degradation and Development, 2000, 11: 501—521
- [9] Mahmood K, Morris J, Collopy J, et al. Groundwater uptake and sustainability of farm plantations on saline sites in Punjab Province, Pakistan. Agricultural Water Management, 2001, 48: 1—20
- [10] 娄博礼, 高志远. 河南省七里营人民公社防止棉田土壤次生盐碱化综合措施的研究. 水利学报, 1960(4): 1—15. Lou P L, Gao Z Y. The synthetic measurement on preventing soil secondary salinization of cotton fields in Qiliying people's commune in Henan Province (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1960(4): 1—15
- [11] 贾大林, 傅正泉. 利用放射性  $I^{131}$  和  $S^{35}$  研究松沙土土体和地下水盐分的运动. 土壤学报, 1979, 16(1): 29—37. Jia D L, Fu Z Q. Investigation on the movement of soluble salts in soil columns by radioisotopic method (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1979, 16(1): 29—37
- [12] 石元春, 李韵珠, 卢锦文, 等. 盐碱上的水盐运动. 北京: 北京农业大学出版社, 1986. Shi Y C, Li Y Z, Lu J W, et al. Saline-alkali soil water and salt movement (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1986
- [13] 尤文瑞, 孟繁华, 肖振华. 蒸发条件下非饱和粉砂壤土水盐动态//俞仁培. 土壤水盐动态和盐碱化防治. 北京: 科学出版社, 1987: 1—14. You W R, Meng F H, Xiao Z H. Trends of soil water and salt on sandy-loam soil with clay interlayer under evaporation (In Chinese)//Yu R P, You W R. Soil water and salt movement and preventing and controlling salinization of soil. Beijing: Science Press, 1987: 1—14
- [14] 孟繁华, 尤文瑞, 王福利. 蒸发条件下非饱和黏土水盐动态的研究//俞仁培, 尤文瑞. 土壤盐化、碱化的监测与防治. 北京: 科学出版社, 1993: 74—82. Meng F H, You W R, Wang F L. Research of the trends on water and salt on unsaturated clay soil under evaporation (In Chinese)//Yu R P, You W R. Surveillance and control of soil saline and alkali. Beijing: Science Press, 1993: 74—82
- [15] 欧阳丽, 孟繁华, 肖振华, 等. 蒸发条件下有黏土夹层粉砂壤土水盐动态//俞仁培, 尤文瑞. 土壤盐化、碱化的监测与防治. 北京: 科学出版社, 1993: 61—73. Ouyang L, Meng F H, Xiao Z H, et al. Trends of soil water and salt on sandy-loam soil with clay interlayer under evaporation (In Chinese)//Yu R P, You W R. Surveillance and control of soil saline and alkali. Beijing: Science Press, 1993: 61—73
- [16] 刘福汉, 王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动. 土壤学报, 1993, 30(2): 173—181. Liu F H, Wang Z Q. Movement on soil water and salt in profiles of different texture under diving evaporation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(2): 173—181
- [17] 彭望球. 土壤盐渍量化量的遥感与 GIS 实验. 遥感学报, 1997, 1(3): 237—240. Peng W L. An experiment of remote sensing and GIS based on quantity of soil salinity (In Chinese). Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 237—240
- [18] 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 地下水作用条件下粉砂壤土盐分动态研究. 土壤学报, 2001, 38(3): 365—372. Liu G M, Yang J S, Li D S. Salt dynamics in soil profiles under condition of different groundwater depths and salinities (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 365—372
- [19] 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究. 土壤学报, 2003, 40(1): 65—69. Liu G M, Yang J S. Salt dynamics in soil under conditions of different groundwater tables and salinities (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 65—69
- [20] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45—51. Yao R J, Yang J S. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 45—51
- [21] 杨劲松, 陈小兵, 周宏飞. 新疆塔里木灌区水盐问题研究. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 69—73, 77. Yang J S, Chen X B, Zhou H F. Study on hydro-salinity in Tarim irrigation area (In Chinese). The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 69—73, 77
- [22] 郭全恩, 马忠明, 王益权, 等. 地下水埋深对土壤剖面盐分离子分异的影响. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 64—67. Guo Q E, Ma Z M, Wang Y Q, et al. Effect of water table on soil salt ions transfer and variation (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 64—67
- [23] 孙博, 谢建仓, 汪妮, 等. 不同蓄水位下水体-土壤循环压盐数值模拟研究. 土壤学报, 2012, 49(3): 437—444. Sun B, Xie J C, Wang N, et al. Numerical simulation of salt suppression in water-soil cycling affected by storage water level (In Chi-

- nese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 437—444
- [24] 罗毅, 胡顺军, 王兴繁, 等. 一种电导率指标测可溶性盐分含量的新方法. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1257—1261. Luo Y, Hu S J, Wang X F, et al. A new method to determine soil soluble salt using electrical conductivity index (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1257—1261
- [25] 朱祖祥. *土壤学*. 北京: 农业出版社, 1982. Zhu Z X. *Soil science* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1982
- [26] 袁剑舫, 周月华. 黏土夹层对地下水上升运行的影响. *土壤学报*, 1980, 17(1): 94—100. Yuan J F, Zhou Y H. The influence of clay interlayer on the upward movement of capillary water in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1980, 17(1): 94—100
- [27] 巩效禹. 均质土剖面中含水量分布状况的探讨. *土壤学报*, 1965, 13(2): 235—240. Gong X Y. Investigate the distribution of soil water content in homogeneous soil profile (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(2): 235—240

## RELATIONSHIP BETWEEN SALT ACCUMULATION IN TOPSOIL OF DESERTED LAND AND GROUNDWATER IN AREAS WITH SHALLOW GROUNDWATER TABLE IN KASHI, XINJIANG

Chen Yongbao<sup>1,2</sup> Hu Shunjun<sup>1†</sup> Luo Yi<sup>1,2</sup> Tian Changyan<sup>1</sup> Yin Chuanhua<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** To quantify the relation of salt accumulation in the topsoil of deserted land with groundwater in areas with shallow groundwater table in Kashi, Xinjiang, in-situ monitoring was performed of soil water content, salt content in the topsoil, depth and mineralization of groundwater and phreatic evaporation in the experimental area under natural conditions; simulation was done of the relationship between phreatic evaporation and groundwater table; quantitative analysis was conducted of the effect of groundwater table and mineralization on salinity of the topsoil; and in the end an empirical model was established for relationships of salt content in the topsoil with water table and mineralization of the groundwater. Results show that within the 5 ~ 50 cm soil layer, soil water content (SWC) increases with depth; the effects of water table and mineralization of the groundwater are significant on salinity of the topsoil; and soil salt content is in a positive linear relationship with mineralization of the groundwater when groundwater table is a const, but in a negative linear one with groundwater table when mineralization of the groundwater is a const. The phenomenon of surface accumulation of soil salts indicates that soil salt content increases with increasing cumulative phreatic evaporation regardless of groundwater table and salt accumulation rate in the topsoil decreases with increasing depth of the groundwater table. The salt accumulation rate in the topsoil of a deserted land with groundwater table deep at 25 cm is twice as high as that with groundwater table deep at 50 cm. The findings of the study could serve as scientific basis for amelioration of salt-affected soils and prevention of soil secondary salinization.

**Key words** Soil salinity; Groundwater table; Groundwater mineralization; Phreatic evaporation

(责任编辑:陈德明)