

干旱区平原水库坝后排水沟对下游 农田土壤水盐运移的影响

黄 风¹, 严新军¹, 毛海涛^{1,2}, 王 琳¹

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2.重庆三峡学院土木工程学院,四川 重庆 404100)

摘 要:干旱区平原水库的渗漏会抬高坝后农田地下水位,使土壤发生盐渍化,许多土地因此减产甚至弃耕。坝后设置排水沟是一种有效控制农田地下水位的措施。本研究采用排水沟调控坝后农田的地下水位,并利用 HYDRUS 模拟出在不同地下水位和深度的条件下土壤含水率与含盐量的变化情况,将实测数据与模拟数据相互对比,检验出模拟值的可靠度。研究表明:地下水位通过排水沟从 1 m 降到 3 m,表层含盐量相差 1.49~33.19 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,因此排水沟遏制地下水位越深,水盐运移越不明显,次生盐渍化越不容易发生,反之,则容易发生土壤盐渍化;地下水位相同时,土体种植植物可以降低含水率和含盐量,其中含水率最大变化为 6.33%,含盐量仅相差 0.08~4.56 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,而且随着土层深度增加其影响的程度也逐渐减小。设置排水沟是解决坝后农田土壤盐渍化的较好方式。

关键词:平原水库;下游农田;土壤水盐运移;排水沟;HYDRUS 模拟;干旱区

中图分类号:S278 **文献标志码:**A

Effects of drainage ditches behind dams of plain reservoirs on soil water and salt transport in downstream farmland in arid regions

HUANG feng¹, YAN Xinjun¹, MAO Haitao^{1,2}, WANG Lin¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, Sichuan 404100, China)

Abstract: The seepage of plain reservoir raises the groundwater level of farmland behind the dam in arid area, which results the soil salinized. Consequently, production is reduced or even abandoned. It is an effective measure to control the farmland groundwater level to set drainage ditch behind the dam. The change of soil water and salt transport after changing groundwater depth is worth of studying. Therefore, drainage ditches was used to regulate the groundwater levels behind the dam in this study, and HYDRUS was used to simulate the soil water content and salinity at different soil depths and different groundwater levels. The reliability of the simulated values was verified by the measured data. The results showed that the groundwater level decreased from 1 to 3 m through drainage ditches and the difference of surface salinity was between 1.49~33.19 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Therefore, the deeper the groundwater level in the drainage ditches, the less obvious the water-salt migration, the less likely secondary salinization would occur. Otherwise, soil salinization would occur easily. When the groundwater level was the same, planting could be used to reduce water content and salt content, the maximum change of water content was 6.33%, the difference of salt content was only about 0.08~4.56 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and the influence gradually decreased with the increase in soil depth. Therefore, setting drainage ditch is a best way to solve soil salinization behind dams to drain the seepage water from reservoirs in time.

收稿日期:2019-07-20

修回日期:2020-01-13

基金项目:国家自然科学基金(51309262);重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjAX0673);重庆市教委 2011 协同创新子课题(061500911);2019 年自治区研究生科研创新项目(XJ2019G164)

作者简介:黄风(1993-),男,重庆彭水人,硕士研究生,研究方向为干旱区土壤水盐运移。E-mail: cqpslhlf@163.com

通信作者:严新军(1976-),男,新疆奇台人,副教授,硕士生导师,主要从事盐渍土生态改良理论研究。E-mail: xjndyxj@163.com

Keywords: plain reservoirs; downstream farmland; soil water and salt transport; drainage ditches; HYDRUS simulation; arid areas

为了农业灌溉,干旱、半干旱区修建了大量的平原水库。水库渗漏使坝后的下游农田土壤盐渍化,导致许多土地减产甚至弃耕。坝后设置排水沟是目前较为常见的降低地下水位和防止盐渍化的工程措施,但排水后坝后土壤水盐动态关系和治理效果仍需深入研究。

针对平原水库引起土壤盐渍化的问题,李荣荣、叶自桐、石元春等^[1-3]认为不论是空间还是时间上,平原水库下游土壤盐渍化状况总体趋于更加恶化,说明了平原水库的建立对坝后农田土壤有很大的危害;王水献、陈亚新、李开明、夏江宝等^[4-7]研究发现平原水库下游农田土壤盐分的变化与地下水埋深的动态变化密切相关。在防治措施方面,许学工、毛海涛等^[8-10]认为应在平原水库周围开挖排水沟,截断地下水进入农田。毛海涛等^[11-13]还提出可采用盐渍化防护毯吸附地表盐分,或者从改良土壤成分的角度出发来降低盐渍化。对于水盐运移的规律研究,目前较为成熟的数值计算有 HYDRUS 软件等,例如潘延鑫、石培君等^[14-15]利用 HYDRUS 对盐碱地进行了模拟,分析出在土壤中水盐运移的情况。综合前人研究发现,要减少平原水库对下游土壤盐渍化的影响,应从工程措施、土壤改良和农田水盐调控等多方面开展工作,但却缺乏工程措施运行与水盐运移的内在关系研究。

因此,本文以新疆典型的平原水库—恰拉水库为例,采用 HYDRUS-1D 模拟恰拉水库坝后排水沟对农田土壤水盐运移的影响,通过试验观测和数值模拟系统研究坝后农田土壤盐分变化特征,分析地下水位的变化对下游土壤水盐运移的影响,以期为坝后农田盐渍化的防治提供理论依据和技术支撑。

1 试验方法

1.1 研究区概况

恰拉水库位于新疆天山南麓塔里木盆地东北边缘塔河下游,坝体为碾压式均质土坝。地理位置在东经 $86^{\circ}36' \sim 86^{\circ}57'$,北纬 $40^{\circ}59' \sim 40^{\circ}04'$ 范围内(图 1),水库设计库容 1.61 亿 m^3 ,建基面高程为 869 m,坝顶高程为 877.3 m,最大坝高 8.3 m,水库设计水位为 875 m。黏土均质坝顶宽 6 m,上下游坝坡均为 1:2.5,坝基深 100 m,以细砂为主。排水沟深度为 6 m,底宽 0.5 m,距离坝趾 100 m。水库坝基采用水平铺盖防渗体,水平铺盖长度为坝前水头 6 m

的 22 倍(下文简称水平铺盖)。水库渗漏抬高了下游农田的地下水位,为了拦截水库渗漏水量,坝后下游 140 m 处设置 3 m 深的排水沟,排水沟与坝轴线平行布置,用于截渗排水。水库坝后的农田土壤主要以黏质壤土为主。

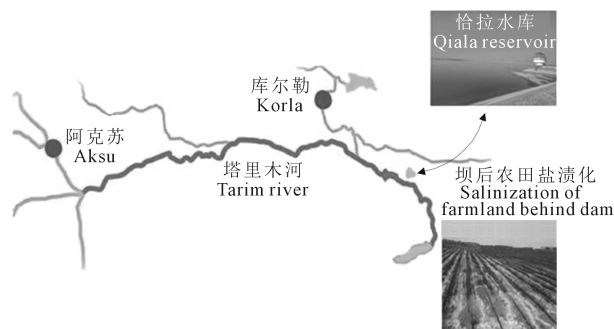


图 1 恰拉水库地理位置

Fig.1 The site of the Qiara reservoir

1.2 工况设置

为了系统地研究地下水位变化和有无植物对坝后农田地下水水盐运移的影响,根据实际情况设置 3 种工况并在 2017 年 5—10 月进行土样采集,经过试验和计算得出实测数据。

工况 1:通过排水沟将坝后农田地下水位控制在 1 m,农田中无植物;

工况 2:通过排水沟将坝后农田地下水位控制在 3 m,农田中无植物;

工况 3:水位控制同工况 2,但农田种植棉花。

根据各工况设置和实际勘测情况,坝后沟渠排水会引起地下水位的降落并呈漏斗状如图 2 所示。

为使观测结果具有代表性,观测点应选在降落漏斗以外。其降落漏斗的影响长度可按下式进行计算:

$$L = (H_0 + h_0) \sqrt{\frac{3kt}{\mu(H_0 + 2h_0)}} \quad (1)$$

式中, k 为渗透系数, μ 为给水度, t 为时间, H_0 为初始水面的高程, h_0 为边界水位。 L 为排水沟影响长度。影响长度示意图如图 2 所示。

按照工况设置情况,根据公式(1)计算出地下水位分别在 1 m、3 m 时排水沟影响长度 L 为 $L_1 = 65 \text{ m}$, $L_2 = 180 \text{ m}$ 。

1.3 观测点的布置

本文的监测点设置在坝后排水沟影响范围外,工况 1 要将地下水位控制在 1 m,若设置在排水沟

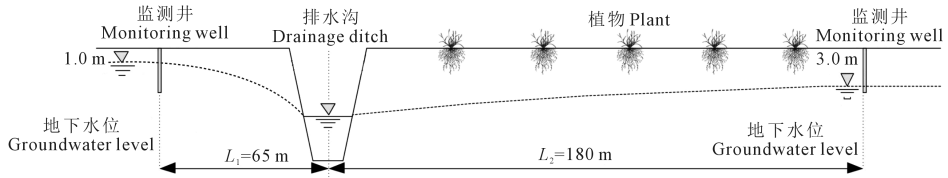


图 2 坝后排水沟上、下游地下水位

Fig.2 Groundwater level in the upstream and downstream of the drainage ditch behind the dam

下游,难度较大。因此工况 1 观测点设置在排水沟和大坝之间,距离排水沟 70 m 处,编号分别为 Q1、Q2、Q3;工况 2、3 的观测点设置在排水沟下游 200 m 处,工况 2 无植物,工况 3 区域种植棉花,编号分别为 W1、W2、W3 和 Y1、Y2、Y3,如图 3 所示。

每个观测孔深度为 1 m,沿土层垂向自上而下分别取 0、30、50、70 cm 和 100 cm 共 5 处土样,进行试验并获得土壤含盐量、含水率。

1.4 土样采集与测定

根据当地气象站实测资料,在 2017 年 5—10 月的非冻结期内,每隔 30~40 d 采集各个工况下监测点剖面土样,测出含水率与含盐量。

(1)在监测点处沿地表垂直挖开地层剖面,各监测点分别在 0、30、50、70 cm 和 100 cm 处采取土壤样品;

(2)将采集的土样装入土样袋中密封保存,防止土壤水分蒸发;

(3)称取 15~20 g 土样装进称量盒中,再放入烘箱,利用烘干法测定土样的含水率;

(4)配一组 NaCl 标准溶液,使用电导率仪测量一组 NaCl 标准溶液的电导率,使用 Excel 建立标准曲线;

(5)将其余土样进行风干,测定土:水(无 CO₂)1:5 浸提液电导率;

(6)根据测定出的电导率代入标准曲线中,计算出含盐量;

(7)所有测定 3 次重复,计算平均值。

2 数值模拟

在上述试验的基础上,根据观测资料 and 实际情况进行数值模拟。

2.1 垂直一维土壤水分运动方程

土壤为均质、各向同性的多孔介质,忽略温度与土壤中的气相对土壤水分的影响,不考虑根系吸水与源汇项,用以研究饱和-非饱和流动问题的一维 Richards 控制方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

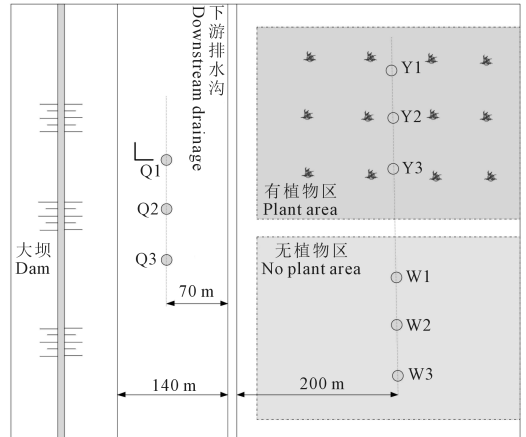


图 3 研究区观测点设置

Fig.3 Settings of observation points in the research area

式中, $K(\theta)$ 为土壤水的导水率, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; θ 是土壤的体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; z 为垂直坐标,可认为是土壤深度, cm ,取向向下为正; h 是土壤压力水头, cm ; t 为时间, h 。

2.2 溶质的运移

由于不考虑一阶动力学吸附问题,所以 μ_w 、 μ_s 、 γ_w 、 γ_s 、 S 都取 0。因此模型中饱和-非饱和多孔介质中非稳定流溶质运移的一维对流-弥散方程^[16]为:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c}{\partial z} \quad (3)$$

式中, c 为土壤溶液中溶质浓度, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$; s 为吸附在土壤颗粒上的固态溶质浓度, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ 为土壤干容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; q 为流速, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; D 为饱和-非饱和水力弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; z 为垂直坐标,可认为是土壤深度, cm ,取向向下为正; θ 是土壤的体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; t 为时间, h 。

2.3 初始条件和边界条件

2.3.1 土壤水分运动的初始条件与边界条件 土壤水分上边界采用第二边界条件,逐日输入通过上边界的变量,包括降水量、潜在蒸发量,在模型中上边界采用大气边界,下边界采用自由下渗排水。根据实测的地下水埋深转换为压力水头赋值,通过变压力水头的方法来观测土壤中水分的变化。

初始条件: $\theta(z, 0) = \theta_0(z) \quad Z \leq z \leq 0, t = 0$

上边界: $-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q_s \quad z = 0, t \geq 0$

下边界: $h(z,t) = h_0(t) \quad z = Z, t > 0$

式中, $\theta_0(z)$ 为土壤初始含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, q_s 为地表水分通量, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,蒸散取正值,灌溉与降水入渗取负值; θ_0 为土壤饱和含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $h_0(t)$ 为下边界压力水头, cm^3 ;模拟区域为: $Z \leq z \leq 0$,其中 Z 为模拟区域底界; t 为时间, h 。

2.3.2 土壤溶质运动的初始条件与边界条件 土壤盐分模型上边界采用浓度通量边界条件,下边界采用零浓度梯度,根据试验的上、下边界监测地下水电导率值进行赋值,通过模型来观测土壤中盐分的变化。

初始条件: $c(z,0) = c_0(z) \quad Z \leq z \leq 0, t = 0$

上边界: $-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + q_s c = q_s c_s(t) \quad z = 0, t \geq 0$

下边界: $c(Z,t) = c_b(t) \quad z = Z, t > 0$

式中, q_s 为地表水分通量, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,蒸散取正值,灌溉与降水入渗取负值; c_0 为剖面初始土壤水电导率, $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$; c_s 为上边界流量的电导率值,当边界流量为土壤水蒸散量或降水量时, $c_s = 0$,当边界流量为灌溉水量时指灌水电导率值, $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$; c_b 为下边界潜水电导率值, $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$; D 为饱和-非饱和水动力弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; θ 是土壤的体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.4 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线反映了土壤含水率与基质势的关系,即土壤水的含量与其能量之间的关系, Van Genuchten 模型的表达方式:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |ah|^{-n}]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, θ 为土壤体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; h 为压力水头, cm ; θ_r 和 θ_s 分别表示土壤的剩余体积含水率和饱和体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; α 为土壤进气值的倒数, cm^{-1} ,一般取 0.005 ~ 0.05; n 为孔径分布指数,一般取 1.1 ~ 3.5;而 $m = 1 - 1/n$

2.5 相关系数

模型采用变水头的方法观测土壤中的盐分与水分变化。在变水头入渗条件下, θ_s 、 K_s 与 n 是对累

积入渗量影响较大的参数^[17],根据试验区土壤水盐数据进一步校正,每一个研究区域校正后将取一个点作为代表,其土壤水力参数如表 1 所示。

本文取 1 m 土体作为模拟剖面,使用 HYDRUS 软件对观测点数值进行模拟。本次模型将通过改变压力水头的大小,模拟出不同深度的水盐迁移情况,根据监测区的数据与模拟出的数据进行比较,判断出模型的可靠性,并可以根据模拟值推断水盐迁移的动态。

3 结果分析

3.1 模型校准与验证

利用 2017 年 5—10 月的非冻结期对恰拉水库下游农田含水率与含盐量进行校正与数据验证,对比了地下水分别在 1 m、3 m 和有、无植物时的模拟值与实测值,如图 4 所示。

由图 4 可知,土壤含水率和含盐量模拟值与实测值的变化情况基本相同,在 0~100 cm 内含盐量随着深度的增加而减少,含水率随深度的增加而增加。模拟值最大含水率为 0.37%,实测值最大含水率为 0.38%,相差 0.01%。随着地下水的富集,土壤含盐量自下而上呈递增趋势。不同深度下土壤含盐量的大小顺序为 30 cm 土层含盐量>50 cm 土层含盐量>70 cm 土层含盐量>100 cm 土层含盐量。实测值的最大含盐量 47.32 g · L⁻¹,模拟值的最大含盐量 48.53 g · L⁻¹,相差 1.21 g · L⁻¹。通过对数据进行相对误差分析可以得到,距表层 30、50、70、100 cm 处含盐量最大相对误差分别为 1.57%、1.44%、1.74%、1.32%,最小相对误差分别为 0.34%、0.26%、0.57%、0.78%;而含水率的最大相对误差分别为 1.17%、1.51%、1.67%、1.34%,最小相对误差分别为 0.29%、0.21%、0.34%、0.54%。根据以上分析可以得到含水率与含盐量的最大相对误差在 1.17%~1.74%,最小相对误差在 0.21%~0.78%。结果表明,此次模拟值与实测值的图像变化趋势大致相同,相对误差偏低,模拟结果能够较好地吻合实际情况,可用于模拟实测值。

表 1 土壤水力参数

Table 1 Soil hydraulic parameters

监测点 Monitoring point	干容重 Dry bulk density /(g · cm ⁻³)	土壤剩余含水率 θ_r /(cm ³ · cm ⁻³)	土壤饱和含水率 θ_s /(cm ³ · cm ⁻³)	经验参数 1 Empirical parameter 1 α	经验参数 2 Empirical parameter 2 n	饱和渗透系数 Saturated permeability coefficient K_s /cm ⁻¹
Q2	1.43	0.0677	0.4082	0.0106	1.490	10.49
Y2	1.46	0.0683	0.4186	0.0102	1.495	10.21
W2	1.40	0.0654	0.4054	0.0115	1.485	10.34

3.2 模拟结果分析

利用校验后的土壤水盐运移模型,分别模拟不同工况下水盐运移过程。

3.2.1 地下水位对含水率的影响 水库水位变化会引起坝后土壤地下水的改变,采用坝后排水沟来调控坝后土壤水位的变化,以减小土壤次生盐渍化。设置地下水位 1 m 和 3 m 作为调控后的水位来做对比研究,不同深度含水率的变化如图 5 所示。

从图 5 可知,各工况下土层含水率随时间整体

呈下降趋势,最终整体趋于稳定。地下水位高度不同,土壤中的含水率也会发生改变。在 0~100 cm 的土壤中,地下水位为 1 m 时的含水率高于 3 m 时的情况。原因是在地下水位较浅时,在外界环境影响下土壤水分通过毛细管上升,相应监测土层的含水率明显偏高,而地下水位为 3 m 时,地下水受外界环境影响较小,水分上升的高度较小,监测区土壤水分自然偏低。从时段上来看,在 5—7 月二者相差最为显著,8—10 月则相近,这是因为在 5—7 月土壤

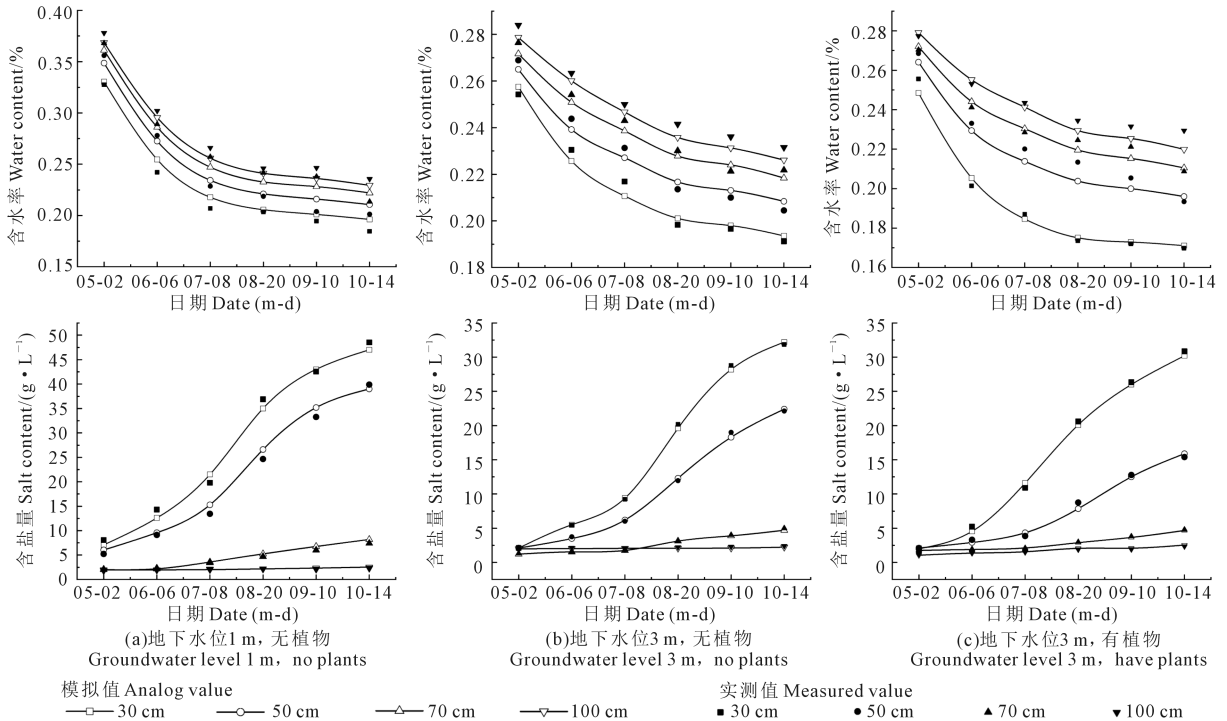


图 4 土壤含水率和含盐量的模拟值与实测值

Fig.4 Simulated and measured values of soil moisture and salinity

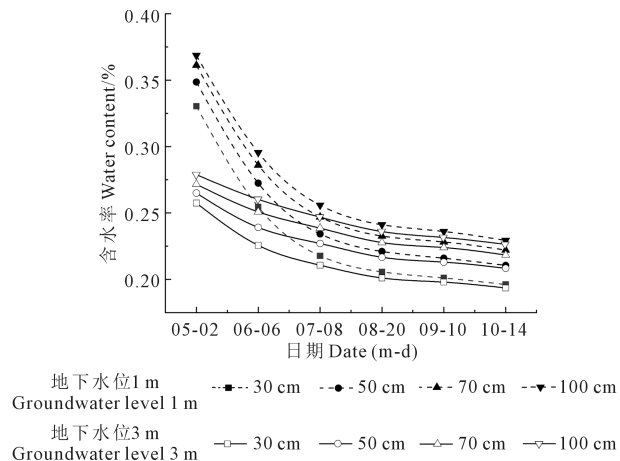


图 5 不同深度含水率的变化

Fig.5 Variation of water content at different depths

水分虽受外界影响,但通过蒸发带走的水分较少,而后期外界强烈的蒸发环境导致浅层土壤水分流失较大,因此二者差值逐渐缩小。地下水位为 1 m 时,土壤深度为 30、50、70、100 cm 的含水率变化值分别为 40.62%、39.59%、38.51%、37.76%,而在 3 m 时其变化明显减少,分别为 24.82%、21.36%、19.62%、18.87%。地下水位越浅时,土壤含水率受土壤外部因素影响就越剧烈,其变化量越大,而随着地下水位的增加受到外部因素影响逐渐减小,因此含水率的变化量逐渐减少。

3.2.2 地下水位对土壤含盐量的影响 地下水位不同时不同土层深度的土壤含盐量如图 6 所示。由图 6 可知,两种工况下各层含盐量整体随时间呈上升趋势,其中土壤深度在 0~50 cm 之间含盐量增长速度较快,50 cm 以下增长缓慢。这是由于土壤离

表层越近,蒸发量就越大,随着土壤深度增大蒸发量逐渐减少。当地下水位为 1 m 时,土壤深度为 30、50、70、100 cm 的含盐量分别增加了 84.90%、84.45%、75.39%、22.74%,而在 3 m 时含盐量明显降低,其变化分别增加了 83.45%、80.63%、74.25%、10.32%。而在同一时间,地下水位从 1 m 降低到 3 m,土壤的含盐量分别降低了 70.28%、65.37%、51.33%、12.62%,变化量最大主要发生在 7 月。从而可得到,地下水位在 1 m 时盐分的变化量比 3 m 时要高,是由于地下水位越低,盐分随着水分迁移到上层土壤,经过强蒸发后,使土壤的盐分增加。因此地下水位越浅含盐量变化越大,含盐量越高。

3.2.3 农田中有无植物对含水率和含盐量的影响

坝后农田中的植物对水盐运移也会有一定的影响,因为植物生长或叶面蒸腾都会消耗一定的水分甚至是部分盐分,进而影响地下水盐运移的变化。

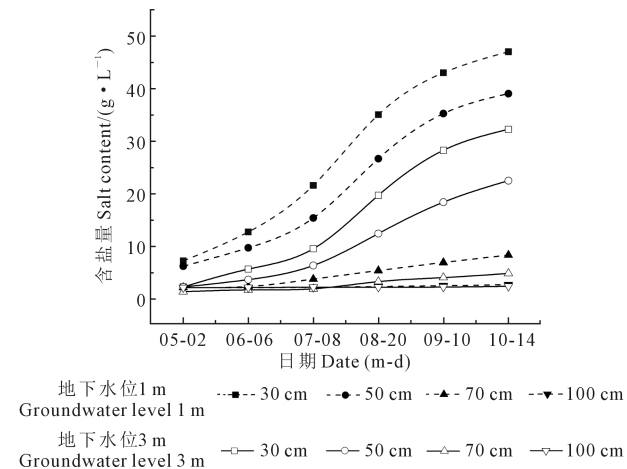
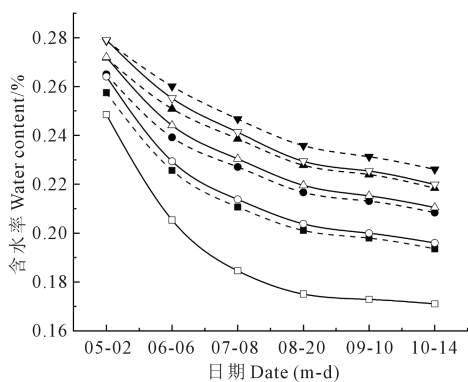


图 6 不同土层深度含盐量的变化

Fig.6 Variation of salt content at different depths

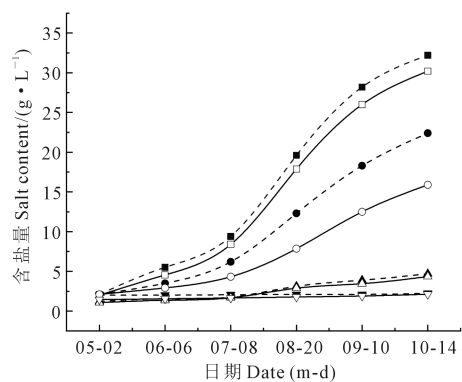


(a)不同土层深度含水率的变化
Variation of water content at different depths

地下水位相同时,农田中有植物和无植物对土壤含水率和含盐量的影响如图 7 所示。

由图 7(a)可知,在相同的地下水位,农田中有植物时的含水率整体比无植物时要低。在整个观测期内农田中有植物时,土壤深度在 30、50、70、100 cm 处,含水率总的变化量分别为 31.15%、25.79%、22.61%、21.18%;而无植物时变化有弱微的减少,其变化增量分别为 24.82%、21.36%、19.62%、18.87%。可见,植物生长消耗土壤中一部分水分,从而降低土壤中的含水率。从图 7(b)可知,在 5—7 月份含盐量增长速度缓慢;在 7 月份以后增长速度较快,土壤表层和浅层集聚的盐分也越来越多;在 8、9 月份盐分集聚速度达到最快,这与该时间段研究区域温度高导致蒸发量大密切相关。当农田有植物时,在研究时段内各观测点土壤深度在 30、50、70、100 cm 处盐分分别增加了 93.45%、90.63%、74.26%、10.31%;而无植物时其相应的增加了 93.34%、86.72%、75.63%、31.60%;其中,浅层 30 cm 处盐分的增加最大。

在同一深度下农田中有植物时水分的变化量比无植物时要高,而含盐量与之相反,有植物时的含盐量比无植物时要低,二者都随着土壤深度逐渐变浅其变化的幅度反而增大。这是因为离地面越近,蒸发量越大,根系吸收的水分越多,土壤中的水分极速下降,水中的盐分就留在土壤中,导致含盐量增大。综上所述,地表植物可以减小土壤内部尤其是表层土的含盐量,对抑制盐渍化有一定的作用;土壤中的含盐量随着深度增加其变化幅度会逐渐减小,深度在 70 cm 以下含盐量相差甚微。由此可见,植物对土壤盐渍化的防治有一定的作用,尤其是对浅层的土壤含盐量有抑制作用。



(b)不同土层深度含盐量的变化
Variation of salt content in different depths

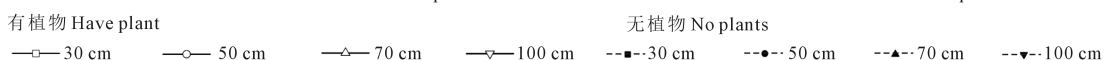


图 7 不同土层深度下含水率与含盐量的变化

Fig.7 Changes of water content and salt content at different depths

3.2.4 各工况下表层含盐量的变化 各处理土壤表层含盐量的变化情况如图 8 所示,地下水位在 1 m 时,土体表层含盐量从 $1.98 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $38.59 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,相差 $36.61 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,上升幅度较大;地下水位 3 m 无植物时,土体表层含盐量从 $0.49 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $5.38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,相差 $4.89 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,上升幅度相对较低;而地下水位为 3 m,农田中有植物时,土体表层含盐量从 $0.42 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 再下降到 $0.44 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,相差 $0.08 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,这是因为地下水位越浅,表层土壤的含水率会越高,即地下水位为 1 m 表层的含水率比 3 m 时的要高,经过蒸发后水走盐留,表层水分降低,盐分增加。当地下水位相同时,植物会吸收一部分水分及盐分,导致盐分会逐渐减少,使曲线呈先升后降的趋势。由上述分析可知,地下水位不同时,地下水位深度越浅,表层含盐量就越多,地下水位从 1 m 降到 3 m,表层含盐量相差 $1.49 \sim 33.19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;地下水位相同时,农田中有植物时的表层含盐量要低于无植物时的含盐量,相差 $0.08 \sim 4.56 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此通过降低地下水位来降低含盐量的方法要比种植植物的方法更有效。

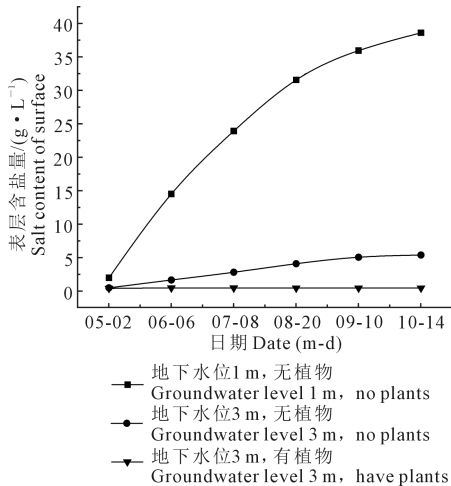


图 8 土壤表层含盐量

Fig.8 Salt content of soil surface

4 讨论

4.1 坝后土壤盐渍化影响因素分析

土壤盐渍化是干旱区平原水库下游农田面临的最大的生态问题,本文着重分析了由水库引起地下水位的变化和有无植物对其影响。除此之外,土壤盐渍化的影响因素还有气象因素(降水、风等),土壤质地、地形地貌、植物种类等等,综合来看分为外因(地上部分)和内因(地下部分)。外因中最主要的是气象因素而引起的蒸发、蒸腾等,是盐渍化发

生的原始驱动力,往往人为无法控制,而内因中主要是水位变动,是可以工程措施来控制的。因此,治理土壤盐渍化往往从内因出发来降低地下水位,如平原水库应在坝前加强防渗,坝后设置排水暗沟、明沟、竖井等,形成“上防下排”的完整措施,并在坝后影响范围内种植根系发达、吸水能力强的植物来降低农田地下水位。此外,还可以通过置换方式来改良土壤质地,配合合理的灌溉制度等综合治理盐渍化。

4.2 改变现有平原水库的设计理念

坝后盐渍化问题主要是由平原水库渗漏所造成的,因此,平原水库的土石坝应将渗流量作为主要的控制指标,并结合坝后水位来推算渗流量的控制范围,设计出完善的防渗体。此外,还要通过截渗、导渗措施,并结合下游渠道或者河道处理好坝后渗漏水的归属,厘清平原水库渗漏水的来龙去脉,做到“防-排-反滤-截-导”五位一体连续的控制措施,才是解决平原水库渗漏危害的科学途径。

因此,除了本文开展的工作以外,还需要从不同角度针对不同问题,开展更加系统的研究,以确保坝后土壤生态健康发展。

5 结论

本文以平原水库坝后采用排水沟调控后,在不同的水位和土壤的深度下,利用 HYDRUS 模拟出土壤含水率与含盐量的变化情况,通过实测数据与模拟数据相互对比,检验出模拟值的可靠度,结论如下:

1) 通过对平原水库坝后采用排水沟调控后的农田进行取样,以各层土壤含水率和含盐量为基础构建 HYDRUS 模型,模拟的结果与实测的结果能够较好吻合,可以反映出土壤不同深度水盐运移情况。

2) 地下水位通过排水沟从 1 m 降到 3 m,含水率降低了 33.14%,表层含盐量相差 $1.49 \sim 33.19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,因此排水沟遏制地下水位越深,水盐运移越不明显,次生盐渍化越不容易发生;反之,则容易发生土壤盐渍化。

3) 地下水位相同时,土体种植植物可以降低含水率和含盐量,其中含水率最大变化为 6.33%,含盐量仅相差 $0.08 \sim 4.56 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,效果不明显,而且随着土层深度增加其影响程度也逐渐减小。

4) 解决土壤盐渍化的最好方式是坝后设置排水沟,将水库渗出的水及时排走,从而降低农田的地下水位,如果地下水位能被有效控制在当地临界水位以下,就可确保土壤不受次生盐渍化的影响。

(下转第 57 页)