

低洼重度盐碱地滴灌水盐调控的环境效应

万书勤¹, 孙甲霞¹, 董世德^{1,2}, 康跃虎^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;
2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘 要:采用“咸水滴灌+高垄+覆膜”水盐调控技术模式,开发利用河套灌区水平排水困难的低洼重度盐碱撂荒地时,研究了该区浅层地下水埋深、浅层地下水电导率(EC_w)、潜土层地下水电导率(EC_i)、土壤饱和泥浆提取液电导率(EC_e)、枸杞成活率和保存率等的变化。结果表明:研究区浅层地下水埋深、 EC_w 和 EC_e 明显受周边和研究区灌溉、降雨等的影响;随着枸杞种植年限的延长及植株蒸腾耗水的增加,整个研究区的浅层地下水埋深、 EC_w 、 EC_i 及 EC_e 均逐年降低,0~40 cm 土层土壤由极重度盐土转变为重度盐土;该技术模式下,枸杞成活率达到 75.4%,保存率达到 67.5%。即可以采用“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式,通过种植枸杞等耐盐碱的多年生林果,来开发利用传统方法难以有效开发利用的地下水浅埋且地下水为咸水的重度盐碱地,通过枸杞生长耗水可以显著降低整个区域的地下水位埋深, EC_w 和 EC_e 也逐年降低。

关键词:低洼盐碱地;地下水浅埋区;浅层地下水埋深;地下水电导率;潜土层地下水电导率;土壤饱和泥浆提取液电导率

中图分类号:S156.4;S275.6 文献标志码:A

Environmental effects of soil water and salinity regulation under drip irrigation in low-lying severe saline-sodic soil

WAN Shu-qin¹, SUN Jia-xia¹, DONG Shi-de^{1,2}, KANG Yue-hu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The study analyzed the changes of shallow groundwater level, electrical conductivity of shallow groundwater (EC_w), electrical conductivity of phreatic groundwater (EC_i), electrical conductivity of saturated paste extract (EC_e), the survival rate and preservation rate of Chinese wolfberry (*Lycium barbarum* L) during the process of low-lying and severe saline-sodic wasteland utilization in Hetao Irrigation District to provide scientific bases for large-scale exploitation and utilization of similar saline-sodic lands by using the “saline water drip irrigation + high ridge + film mulching” technology mode. The results showed that the shallow groundwater level, EC_w , and EC_e in the study area were significantly affected by both rainfall and irrigation in both surrounding areas and the study area. With the prolongation of wolfberry planting, water consumption by the plants increased, the shallow groundwater level decreased year by year, and the EC_w , EC_i , and EC_e also decreased. The top 40 cm layer soil changed from very severe saline soil to heavy saline soil. Under this farming mode, the survival rate of wolfberry reached 75.4% and the preservation rate reached 67.5%. That is to say, by planting salt-tolerant perennial plants such as Chinese wolfberry and other salt-tolerant plants, the “saline water drip irrigation + high ridge + film mulching” practice mode can be adopted to exploit severe saline-sodic lands with shallow and saline groundwater, which

收稿日期:2017-11-12 修回日期:2017-12-11
基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201504402);国家重点研发计划课题(2016YFC0501304);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC028);国家自然科学基金青年科学基金项目(51409126)
作者简介:万书勤(1978-),女,江西抚州人,副研究员,研究方向为农田水循环调控与农业水资源高效利用。E-mail:wansq@igsnr.ac.cn
通信作者:康跃虎(1963-),男,甘肃临洮人,研究员,研究方向为农田水循环调控与农业水资源高效利用。E-mail:kangyh@igsnr.ac.cn

are usually difficult to be effectively farmed by traditional methods. Through water consumption by plant, the groundwater level was significantly lowered and the shallow groundwater EC_w and EC_e also decreased yearly.

Keywords: low-lying saline-salic soil; shallow groundwater area; shallow groundwater level; electrical conductivity of groundwater; electrical conductivity of phreatic groundwater; electrical conductivity of saturated paste extract

河套平原地处内陆,是我国西北最主要的农区与生态脆弱区。由于气候干燥、灌区排水不畅,土壤普遍积盐严重,尤其是在灌区的末梢,存在着大面积的盐渍化耕地和盐碱荒地^[1]。治理和开发利用这些盐碱地资源,是我国农业可持续发展的重要途径之一,对改善当地生态环境具有重要意义。

宁夏平罗县属于河套平原“西套”土壤盐渍化最严重的地区之一^[2],传统的盐碱地开发利用方法,如大水漫灌淋盐与排水、种植水稻等,因地形地貌条件不利于排水,修建排水系统难度大、投资费用高,或因地下水矿化度高,水稻秧苗成活率及分蘖率低、产量低等原因,均难以有效实施,致使大面积土地成为撂荒地。2005 年康跃虎研究团队采用“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式,成功地将撂荒近 30 年的 6.7 hm² 盐碱荒地开发为优质枸杞田。该技术模式成功地调控了水分、盐分在土壤剖面中的分布,在枸杞根系分布区形成了一个高水分低盐区^[3-4],为枸杞的生长提供了良好的微土壤环境,并且 0~40 cm 深度土壤酶活性也随着枸杞种植年限的延长而逐年提高^[5-6]。

2013 年,平罗县在自治区盐碱地改良项目的支持下,采用康跃虎提出的“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式,结合田间排水沟道高标准整治,开发利用试验区周边的 133 hm² 左右重度盐碱撂荒地。本文通过综合分析项目实施 3 年中,研究区浅层地下水埋深、地下水电导率、土壤饱和泥浆提取液电导率等的变化规律,以期采用该技术模式大面积开发利用类似低洼重度盐碱地提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

研究区位于宁夏回族自治区平罗县灵沙乡何家村(38°59'N,106°45'E,海拔约 1 095 m),总面积约 133 hm²(图 1)。该地属银川平原引黄灌区的末梢,属典型的温带大陆性气候,全年日照充足,蒸发强烈,空气干燥,温差较大,无霜期短。2014、2015 年和 2016 年枸杞生长季(5—10 月)蒸发量分别为 1 172.5、1 309.7 mm 和 1 215.8 mm,累计降雨量分别为 126.3、143.2 mm 和 131.9 mm,降雨主要集中在 7—9 月,蒸发量约为降雨量的 9.2 倍。

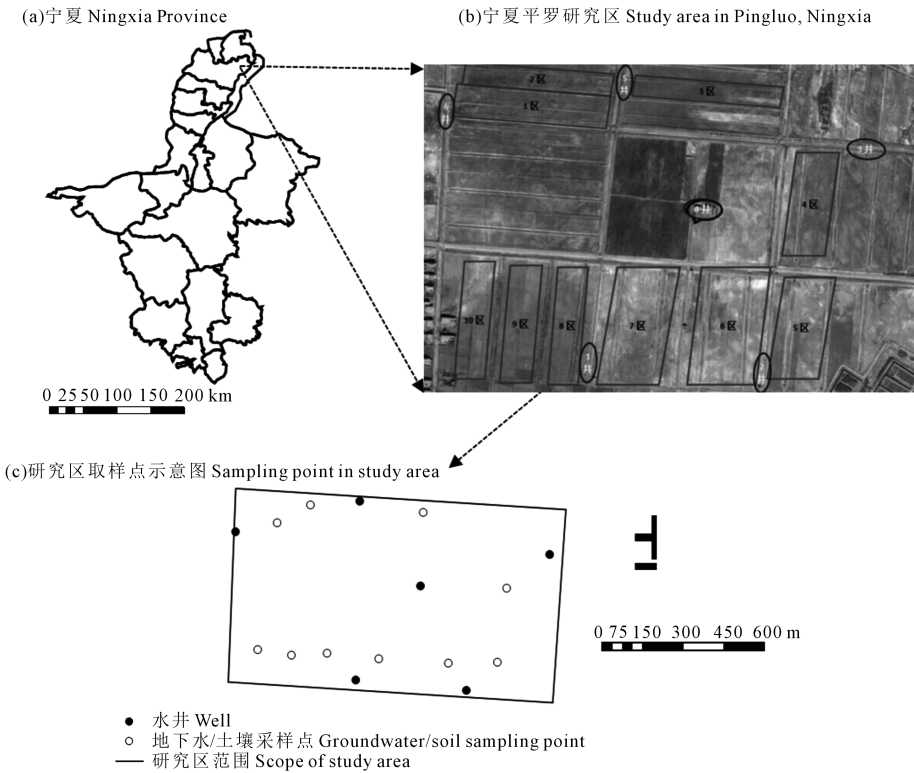


图 1 研究区位置图及取样示意图
Fig.1 Schematic map of study area and sampling location

研究区为黄河冲积平原区,地层岩性主要为细砂、粉细砂夹薄层粘砂土层。地下水含水层为多层结构,水化学成分复杂,阳离子主要是 Na^+ ,阴离子主要是 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,无论是潜水还是承压水,矿化度大部分为 $5\sim 11.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

研究区地势低平,稍有起伏,盐碱地改良项目实施前,浅层地下水埋深长期在 $30\sim 40\text{ cm}$ 之间,盐分表聚明显,地表有盐霜或结皮,表层($0\sim 10\text{ cm}$)含盐量平均为 $13.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (饱和泥浆提取液电导率 EC_e 平均为 $20.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$),其中阳离子主要是 Na^+ ,占全盐含量的 28%(质量比,下同),阴离子主要是 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,分别占全盐含量的 35.3%和 27.9%,属于 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ 类盐土,pH 值($1:5$ 土水比提取液)为 8.9 左右。土壤质地为粉质土(黏粒 0.37%,粉粒 92.00%,砂粒 7.63%),土壤容重平均为 $1.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验基本情况

2013 年底完成研究区田间排水沟道整治,2014 年 4 月底完成研究区建设。根据井的出水量、枸杞高峰期耗水量等参数,整个研究区划分为 6 个单独的滴灌灌溉区,每个区面积约 22 hm^2 。每个滴灌灌溉区是一个独立的灌溉系统,拥有独立的机井、水泵、变频器、灌溉系统首部等。每眼井的钻井深为 60 m 左右,出水量为 $50\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。灌溉系统首部由全自动控制器、反冲洗控制器、离心式水沙分离过滤器、全自动反冲洗叠片过滤器和水动注肥泵精确施肥系统等组成。田间管网系统主要由干管(110PVC 管)、分干管(75PVC 管)、支管(50PE 管)、毛管(内径 16 mm ,流量 $1.38\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴头间距 200 mm ,壁厚 0.4 mm)、阀门箱、电磁阀、水表及各种管件组成。

种植前进行深翻,深度 40 cm 以上,创造适宜盐分淋洗的良好条件。平整土地,平整度高差小于 15 cm 。在地块末端修建排水沟。枸杞起垄种植,垄高 50 cm ,垄顶宽 60 cm ,两垄中心间距 300 cm 。在每条垄中间位置种植 1 行枸杞,株距 100 cm 。垄面上覆盖黑色塑料地膜。

枸杞当日栽植后立即进行灌水,灌水量为 10 mm 左右,用于淋洗土壤中的盐分和为期望的湿润范围提供足够的水分。枸杞种植后的第 1 年,整个生长季每天上午、下午各灌溉 1 次,每次灌水 2 mm ;从第 2 年开始,在灌水器正下方 20 cm 深度安装 1 支负压计,监控土壤水分状况,当土壤基质势降低到 $-5\sim -10\text{ kPa}$ 时,开始灌水,每次灌水 4 mm 。9 月底~10 月初枸杞落叶进入休眠期后停止灌溉。每年 10 月底~11 月上旬进行冬灌、次年 3 月上旬~中

旬进行春灌,灌水量为 10 mm 左右。

1.3 分析项目与方法

1.3.1 浅层地下水埋深 在研究区的 10 个位置(图 1b),布设水位管。水位管采用 $\phi 65\text{ mm}$ PVC 塑料管,水位管底部设 50 cm 沉淀段,沉淀段以上为滤水段,滤水段管壁设 6 列孔径为 6 mm 的滤水孔,滤水段外壁用 3 层纱网包裹并固定。用土钻钻孔至地表 150 cm 以下,将制作好的水位管放入孔中。钻孔与管间用砂子回填至过滤段,再用粘土填充。水位管管口高出地面 20 cm 以上并安装管口盖以防地表水及杂物进入管内。

利用水位计测出水位管内水面距管口的距离,然后用水准测量的方法测出水位管管口绝对高程,最后通过计算得到水位管内水面的绝对高程。

1.3.2 浅层地下水电导率 用软管吸取地下水,用 DDS-11A 电导率仪(上海精密仪器有限公司)测定浅埋深地下水的电导率(EC_w)。2014—2016 年的 3—11 月,基本每个月测定一次。

1.3.3 潜水层地下水电导率(机井灌溉水电导率)

2014 年 3—11 月,基本每个月取一次研究区 6 眼机井的灌溉水水样,测定其电导率(EC_i)。2015—2016 年的 3—11 月,仅取研究区中央机井(4 号井)灌溉水水样,基本每个月测一次电导率(EC_i)。

1.3.4 土壤饱和泥浆提取液电导率 以地下水位观测点为圆点,在直径为 100 cm 范围内的位置,用土钻在垄面取土样,取样深度分别为 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40\text{ cm}$ 。2014—2015 年的 3—11 月,基本每个月取一次土样。

采用国际通用的方法将土样制作成饱和泥浆(USDA,1954),用 DT5-1 离心机(北京时代北利离心机有限公司)离心获得饱和泥浆提取液,再用 DDS-11A 电导率仪测定提取液的电导率(EC_e)。

1.3.5 枸杞的成活率和保存率 分别于 2014 年 9 月和 2015 年 9 月,在研究区的 10 个位置各选 3 行枸杞(约 300 株枸杞),统计枸杞的成活率、保存率。成活率为一定面积枸杞成活株数占原来总株数的百分比;枸杞成活后,由于环境侵袭、人为伤害等诸多因素的影响,死亡一部分后保存下来的株树与原来总株树的百分比为保存率。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 ArcGIS 软件对数据进行分析。ArcGIS 中地统计学的空间差值采用普通克里格差值方法。

2 结果与讨论

2.1 滴灌盐盐调控对地下水环境的影响

2.1.1 浅层地下水埋深 研究区浅层地下水埋深呈现出由浅逐渐变深之后又变浅的周年变化规律(图 2)。以 2015 年为例,在年初 3—4 月份地下水埋深较浅,平均为 74.3 cm;5—9 月份,地下水埋深逐渐变深,最深降低到 105.3 cm,相比 3—4 月份加深了 41.7%;到 11 月份左右,研究区地下水埋深又整体变浅,平均为 96.5 cm。上述地下水埋深周年变化主要原因是:年初 3—4 月份周边引黄灌溉及研究区进行春灌,使得地下水埋深处于一个较浅的水平,5—9 月是枸杞生育高峰期也是其耗水高峰期,频繁的抽取潜水层地下水进行灌溉,相应地引起浅层地下水位的不断降低,11 月份研究区及周边区域进行冬灌又显著地抬升了浅层地下水位。2016 年 7 月和 8 月地下水埋深较浅(平均为 79.6 cm)主要是因为,地下水位观测的前 2 天分别有一次 24.3 mm 和 27.8 mm 的降雨,研究区排水不及时;到 9 月份研究区地下水埋深又降低到 106.4 cm。

从图 2 可以发现,随着枸杞种植年限的延长,从 2014 年到 2016 年年间研究区地下水埋深逐年降低。2014 年 5—10 月枸杞生长季地下水埋深平均值为 87.8 cm,2015 年同期的平均值为 97.6 cm,较 2014 年加深了 98 mm,加深了 11.2%;2016 年 10 月底的地下水埋深(115.2 cm)相比 2015 年(96.5 cm)加深了 19.4%。从图 3 也可以明显看到,与 2014 年相比,2015 年整个研究区的地下水位显著降低,尤其是地下水埋深较深的西南部,其地下水位降低尤为剧烈。Jia 等^[8]、杜宇旭等^[9]的研究得出,滴灌覆膜灌溉条件下 2 年生枸杞的耗水量在 400 mm 左

右,5 年生枸杞耗水量达到 600 mm 左右。考虑到研究区枸杞生长季两年降雨量差异不大、垄面覆盖时蒸发影响较小、未测到明显的地下水侧向补给与排出等,可以推测随着枸杞的生长发育,植株逐年增加的蒸腾耗水是造成研究区地下水位逐年降低的主要原因之一。

此外,2015 年初研究区的地下水埋深为 76.8 cm,较 2014 年底(49.9 cm)加深了 53.9%;2016 年初的地下水埋深为 106.4 cm,较 2015 年底(96.5 cm)加深了 99 mm,降低了 10.3%。有研究表明在地下水埋深浅的地区,大量潜水直接补给到土壤中形成季节性冻土,在冻结状态下,土壤含水率可达到饱和或者过饱和状态,此时地下水损耗较大,会造成地下水位显著下降^[10-11]。尽管研究区垄面覆盖蒸发量小,但垄坡和垄沟大部分范围未进行覆盖,由此可知冬季潜水蒸发是造成 2014 年底至 2015 年初枸杞休眠期地下水埋深显著降低的主要原因。研究区 2015 年底,地下水埋深已经降低到了 96.5 cm,较深的地下水埋深使得冬季潜水蒸发显著降低,因此可以推测枸杞休眠期耗水是造成 2016 年初地下水位降低的主要原因,这同徐利岗等^[12]、李怀等有^[13]的研究发现也基本一致。学者们得出在 11 月份至次年 3 月底,尽管果树处于落叶休眠期,但其日耗水量在 1.2 mm 左右,即在历时五个月左右的休眠期,果树的耗水量可以达到 100 mm 左右。

综上分析可知,在地下水浅埋地区,种植枸杞等耐盐碱的多年生林果,抽取地下水进行灌溉,植株生长季和休眠期的生长耗水对降低地下水位的作用是非常显著的。另外,当地下水埋深浅时,其冬季潜水蒸发降低地下水位的作用也是不可忽略的。

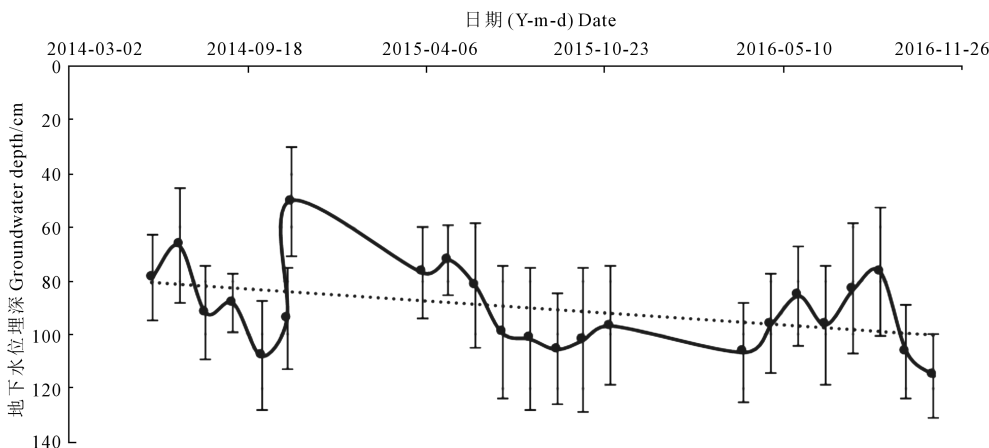


图 2 2014—2016 年研究区平均地下水埋深

Fig.2 The average groundwater level in the study area in 2014—2016

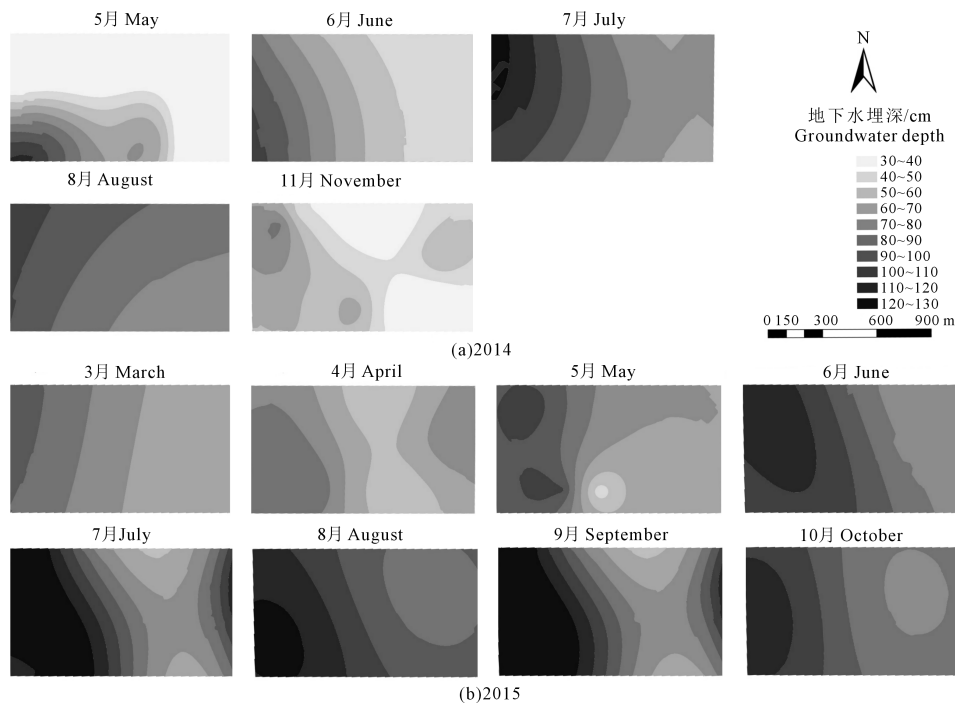


图 3 2014 年和 2015 年研究区地下水埋深时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of groundwater level in the study area in 2014 and 2015

2.1.2 浅层地下水电导率(EC_w) 项目刚执行的2014年,浅层地下水电导率(EC_w)呈现出由低变高又逐渐变低再升高的周年变化规律(图4)。结合地下水埋深的分析可知,2014年5—6月,研究区浅层地下水位升高, EC_w 也升高,这主要是因为2014年4—5月枸杞刚种上,大量抽取潜土层地下水进行灌溉,将垄体的盐分大量淋洗到地下水中。6—9月,随着地下水埋深的不断降低(图2和图3) EC_w 不断降低(图4和图5),这很可能是因为灌溉水即潜土层地下水电导率(EC_i)要小于 EC_w ,同时雨季降雨也在一定程度上降低了 EC_w 。11月初冬灌结束后,研究区浅层地下水位显著抬升(图2和图3), EC_w 也升高到 $19.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (图4和图5),这主要是因为冬灌较大的灌水量,将整个垄体尤其是垄坡上的盐分都淋洗到了地下水中造成的。

2015年和2016年年内研究区 EC_w 是不断降低的。2015年 EC_w 由3月的 $17.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 降低至10月的 $6.3\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,降低了62.9%;2016年 EC_w 由5月的 $11.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 降低至10月的 $3.9\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,降低了64.8%。从2014年和2015年整个研究区 EC_w 的时空分布图(图5)也可以明显看到,与2014年相比,2015年研究区同期 EC_w 显著降低。结合研究区地下水埋深的时空分布图(图3)可以发现,2014年5月项目执行初期,地下水埋深较深的西南部,其 EC_w 较高(图5),即在项目执行初期,研究区地下水埋深

越深区域其 EC_w 值也相对越高;但是随着不断地抽取潜层地下水灌溉,地下水埋深较深的西南部,年际间地下水位降低更加剧烈,其 EC_w 降低也更显著。

从2014年到2016年年际间研究区 EC_w 不断地降低,并且空间变异性显著降低(图4)。其中2014年5—10月 EC_w 的平均值为 $17.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,2015年同期为 $9.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,2016年同期为 $5.9\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,平均每年降低 $5.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,平均降低率为41.6%(图4)。由此可知,在地下水浅埋地区,种植枸杞等耐盐碱的多年生林果,抽取地下水进行灌溉时,不仅浅层地下水位显著降低,浅层地下水电导率也显著降低。

2.1.3 潜土层地下水电导率 即机井灌溉水电导率(EC_i),图6为2014年研究区潜土层地下水电导率,即6眼机井灌溉水电导率(EC_i)的时空分布图。5月28日,研究区6眼机井 EC_i 基本一致,平均值为 $8.4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,显著低于研究区平均浅层地下水 EC_w ($12.1\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$);6月底, EC_i 在空间分布上发生变化,其中西北角 EC_i 值显著升高、中间区域的值降低、东部的值基本维持不变,平均 EC_i 值升高到 $11.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。这可能是由于大量抽取潜土层地下水灌溉,引起地下水径流或者潜土层地下水在垂直方向上与浅层地下水和土壤水发生水量交换等因素所致。9—10月份,研究区 EC_i 在区域分布上趋于均匀,平均值为 $10.2\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

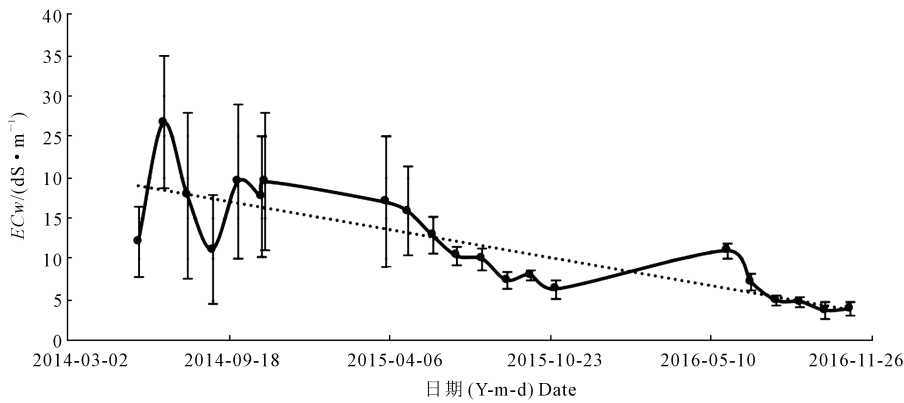


图 4 2014—2016 年研究区平均地下水电导率 (EC_w)

Fig.4 The average electrical conductivity of groundwater (EC_w) in the study area in 2014—2016

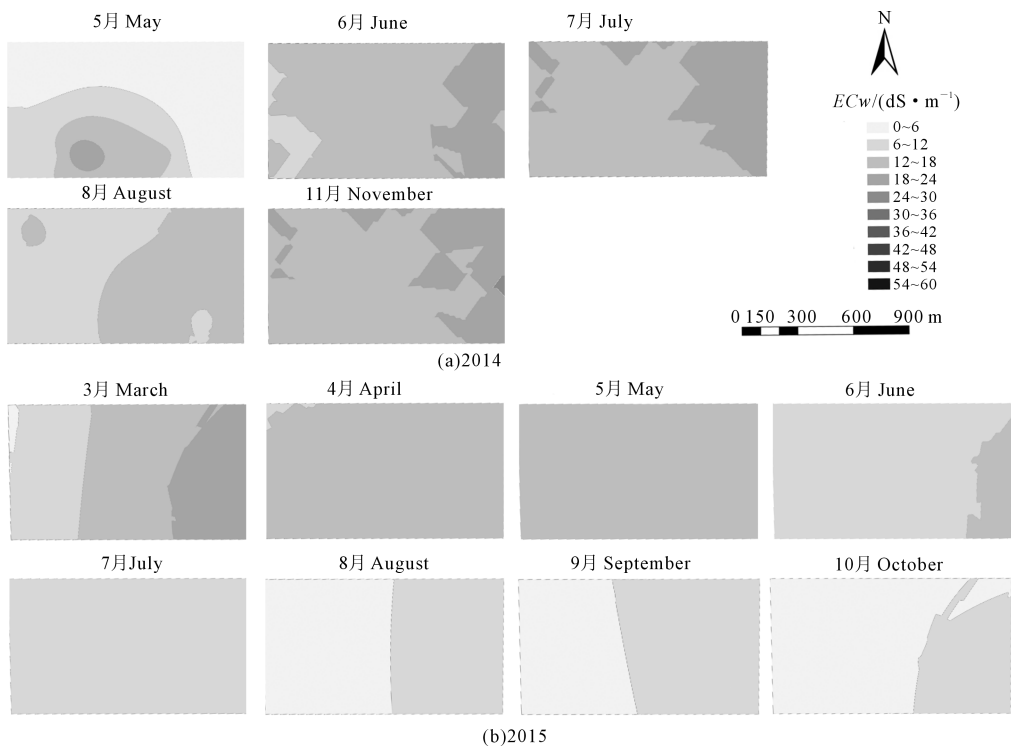


图 5 2014 年和 2015 年研究区地下水 EC_w 值的时空分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of groundwater electrical conductivity (EC_w) in the study area in 2014 and 2015

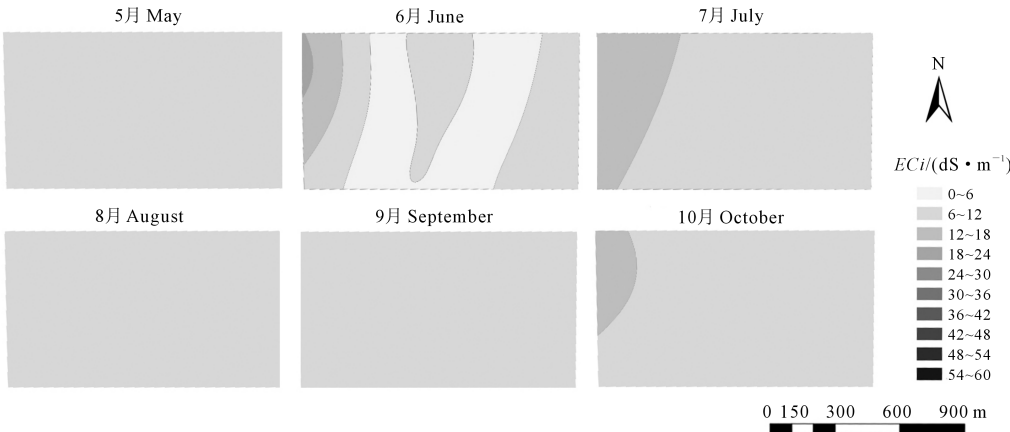


图 6 2014 年 6 眼机井灌溉水电导率 (EC_i) 的时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of electrical conductivity (EC_i) of six wells in 2014

2015 年和 2016 年仅测定了研究区中央 4 号机井 EC_i ,由图 7 可知,4 号机井每年年初(4 月份)的 EC_i 值,均较前一年年底(10 月份)的值有明显地升高,即经过枸杞的休眠期, EC_i 会升高,平均升高 1.4~4.3 $dS \cdot m^{-1}$,这很可能是在整个冬季潜水层地下水在垂直方向上与浅层地下水和土壤水充分发生了水量交换。但是在枸杞的生长季,即 4 月份之后 EC_i 不断降低,2015 年 10 月底 EC_i 为 7.3 $dS \cdot m^{-1}$,较 2015 年 4 月份的 EC_i (14.4 $dS \cdot m^{-1}$) 降低了 42.9%;2016 年 10 月底 EC_i 降低到 5.4 $dS \cdot m^{-1}$,较 2016 年 4 月份的 EC_i (8.7 $dS \cdot m^{-1}$) 降低了 37.6%。

总体上,研究区潜水层地下水 EC_i 不断降低,这很可能是因为研究区大量抽取潜水层地下水进行灌溉(年灌水量大约为 660 mm)后,加大了黄河水或者周边含盐量低的潜水层地下水对研究区潜水层地下水的补给量,从而导致其 EC_i 的不断降低,从而引起了研究区浅层地下水电导率(EC_w)的不断降低。

2.2 滴灌水盐调控对土壤环境的影响

从表 1 可知,2014 年各时期 0~40 cm 深度平均 EC_e 的变异系数为 56.8%~90.7%,平均值为 70.8%,2015 年各时期 0~40 cm 深度土层平均 EC_e 的变异系数为 2.1%~21.8%,平均值为 8.6%,即随着枸杞种植年限的延长, EC_e 的变异性降低,分布趋于均匀。总体上,2014 年研究区 EC_e 高,尤其是北部区域,而 2015 年研究区 EC_e 低且整体趋于一致(图 8)。

由表 1 和图 8 可知,2014 年 7—9 月,0~40 cm 深度土层处于脱盐状态,平均 EC_e 值由 19.4 $dS \cdot m^{-1}$ 降至 17.4 $dS \cdot m^{-1}$,这主要是由于枸杞生长季频繁的灌溉和雨季降雨;到 10 月底, EC_e 又显著升高,0~40 cm 土层的平均 EC_e 值增加到 22.5 $dS \cdot m^{-1}$,这主要是因为 9 月底枸杞落叶停止灌溉后,植株蒸腾和垄坡土面蒸发引起盐分向上层土体聚集;11 月

底土体平均 EC_e 值又稍有降低,为 21.3 $dS \cdot m^{-1}$,这主要是在 11 月上旬研究区进行了冬灌。2014 年,各时期 0~40 cm 土层的平均 EC_e 值为 19.8 $dS \cdot m^{-1}$,属于极重盐土^[7]。

经过冬季的冻融及 2015 年 3 月中旬的春灌,2015 年 3 月底,研究区平均 EC_e 显著降低,较 2014 年底的 EC_e 值(21.3 $dS \cdot m^{-1}$) 降低了 10.3 $dS \cdot m^{-1}$,降幅为 48.4%。4—8 月枸杞生长季平均 EC_e 有逐渐升高的趋势,与 2014 年同期 EC_e 的变化规律不一致。这很可能是因为 2014 年为项目执行的第一年,整个垄体土壤盐分本底值较高,滴灌将滴头附近区域土壤盐分不断地淋洗到下层土壤及地下水中,所以 0~40 cm 深度土层显示为脱盐状态;而 2015 年项目执行的第二年,随着枸杞的生长,蒸腾量不断增大,总的灌水量也不断增加,因为机井灌溉水为咸水,由灌溉带入土体中的盐分也不断地增多。因此,咸水滴灌条件下,枸杞生长季 0~40 cm 土层 EC_e 的变化趋势,取决于土壤盐分淋洗与灌溉带入盐分之间的关系。9 月底枸杞落叶停止灌溉后,研究区的平均 EC_e 升高到 22.2 $dS \cdot m^{-1}$,而到 10 月底冬灌后又降低为 12.5 $dS \cdot m^{-1}$,这与 2015 年同期 EC_e 的变化趋势一致。2015 年各时期 0~40 cm 土层的平均 EC_e 值为 14.4 $dS \cdot m^{-1}$,属于重度盐土^[7]。

综合分析研究区两年 EC_e 的变化,2015 年 7—10 月平均 EC_e 值为 16.8 $dS \cdot m^{-1}$,相比于 2014 年同期的值(19.4 $dS \cdot m^{-1}$) 降低了 13.3%。从 2014 年和 2015 年整个研究区 0~40 cm 深度土层 EC_e 的时空分布图(图 8)也可以明显看到,与 2014 年相比,2015 年研究区同期 0~40 cm 深度 EC_e 显著降低。由于 2 年生枸杞鲜果产量较低,枸杞落叶还田,因此可以推测,枸杞植株带走的土壤盐分较少,研究区 0~40 cm 土层 EC_e 降低,主要是因为土壤盐分被淋洗到下层土壤或者地下水中。

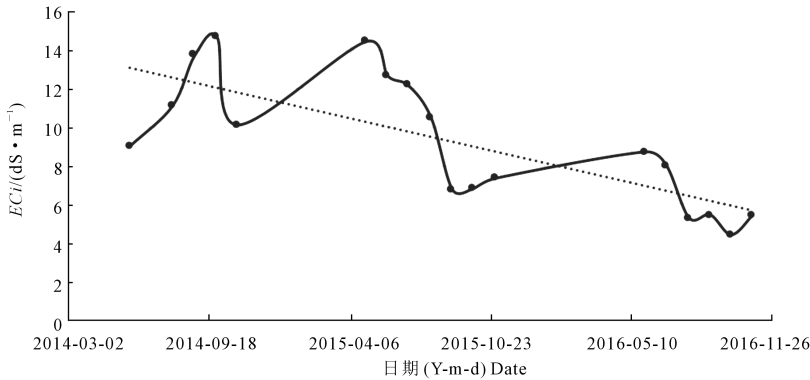


图 7 2014—2016 年研究区 4 号机井灌溉水电导率(EC_i)
Fig.7 The electrical conductivity (EC_i) of No. 4 well in the study area in 2014—2016

表 1 2014 年和 2015 年各时期 0~40 cm 深度土层平均 E_{Ce} 值的统计特征值
Table 1 Statistical characteristics of mean E_{Ce} at 0~40 cm in 2014 and 2015

日期 (Y-m) Date	平均值 Mean /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	最小值 Minimun /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	最大值 Maximum /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	标准差 Standard deviation /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
2014-07	19.4	4.9	41.7	13.9	71.7
2014-08	18.3	5.1	35.0	10.4	56.8
2014-09	17.4	5.6	41.4	12.7	73.2
2014-10	22.5	5.9	59.3	20.4	90.7
2014-11	21.3	6.2	48.9	13.1	61.4
2015-03	11.0	10.1	11.4	0.4	3.3
2015-04	11.6	10.8	11.9	0.4	3.1
2015-05	11.1	10.8	11.5	0.2	2.1
2015-06	13.9	12.2	15.8	1.1	8.1
2015-07	15.8	12.8	18.3	2.1	13.5
2015-08	16.8	13.8	19.3	1.8	10.9
2015-09	22.2	19.2	35.7	4.8	21.8
2015-10	12.5	11.3	13.4	0.7	5.7

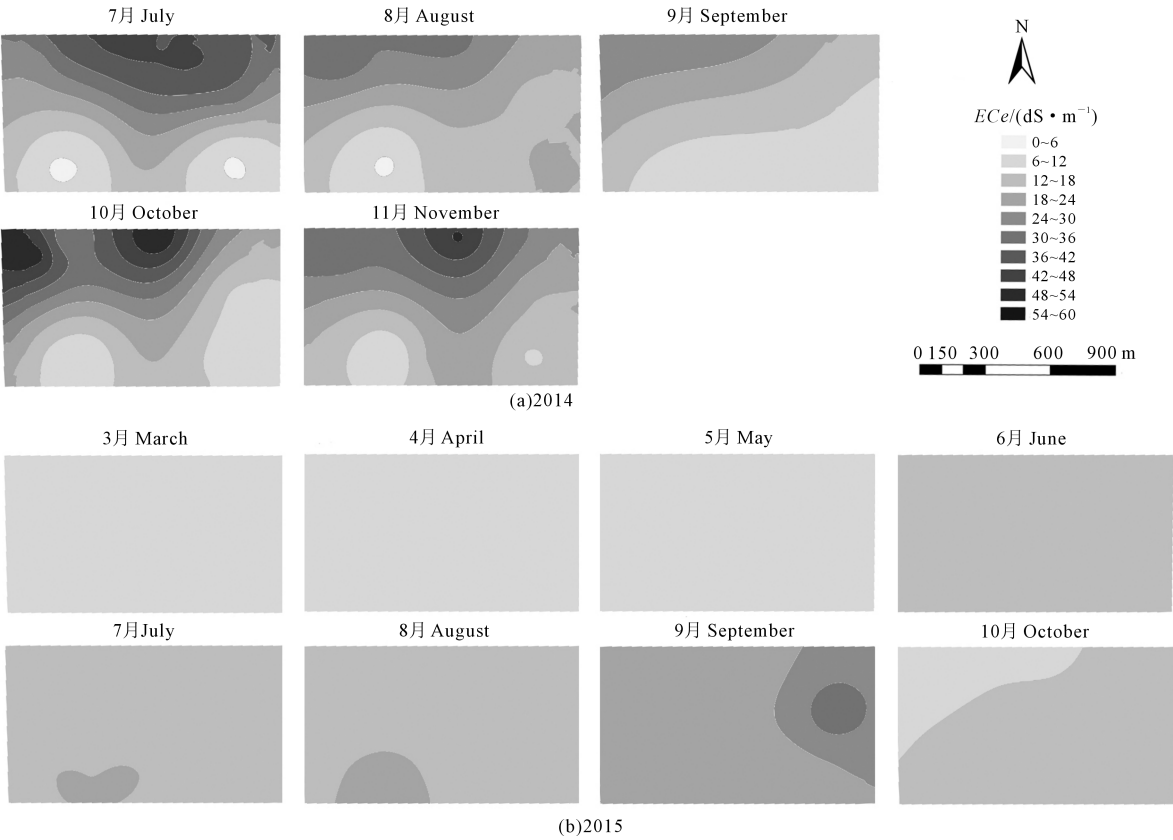


图 8 2014 年和 2015 年研究区 0~40 cm 深度平均土壤饱和泥浆提取液电导率 (E_{Ce}) 时空分布
Fig.8 Spatial and temporal distribution of mean electrical conductivity of soil saturated paste extract (E_{Ce}) at 0~40 cm in 2014 and 2015

2.3 滴灌水盐调控对枸杞成活率和保存率的影响

2014 年枸杞生育期结束时的成活率和 2015 年的保存率如表 2 所示。由表可知,2014 年 9 月份调查时研究区枸杞平均成活率为 75.4%。除研究区西北部的 1 区、2 区和 3 区外,其他区内枸杞成活率都达到了 80% 以上,9 区(研究区西南部)甚至达到了 96%。1 区、2 区、3 区成活率低于 80%,其中 1 区、2

区枸杞成活率仅为 53% 和 17%, 主要是因为 1~3 区,尤其是 1 区和 2 区,土壤盐分非常高,平均 E_{Ce} 为 $34.6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,为极重度盐土(图 8);另外相对于其他区,这 2 个区土壤质地特别粘重,土壤中混有红粘土、龟裂碱土等,因此机械起垄时,垄的规格达不到要求,垄高低于 50 cm、垄面较窄;另外,1~3 区枸杞栽植时正值降雨,田间泥泞,农户为求方便,直接

表 2 2014 年和 2015 年生长季末枸杞的成活率和保存率
Table 2 Survival and preservation rate of wolfberry (*Lycium chinese*) at the end of growing seasons in 2014 and 2015

区域 Area	2014 年成活率/% Survival rate in 2014	2015 年保存率/% Preservation rate in 2015
1	53	43
2	17	14
3	72	64
4	84	69
5	82	76
6	80	70
7	93	92
8	95	84
9	96	86
10	82	77

注:分区详见图 1(b).
Note: The partitions are shown in figure 1(b).

将枸杞苗插到盐碱土中,没有按照要求栽种。

2015 年枸杞生长期末各区枸杞的平均保存率为 67.5%,较 2014 年同期降低了 10.5%。根据田间观测可知,2015 年枸杞死亡主要发生在春季,4 月初枸杞正常灌水后,并没有出现植株继续死亡的现象。由此说明在低洼重度盐碱地上,枸杞萌芽时及时进行春灌,有利于保证枸杞的保存率。2016 年由于枸杞萌芽时灌溉及时,田间观测枸杞的保存率基本同 2015 年一致。

综合分析整个研究区枸杞的成活率、保存率与浅层地下水埋深、浅层地下水 EC_w 和 EC_e 等的关系可以知道,在地下水埋深较深的西南部(7 区、8 区和 9 区),枸杞生长季 EC_w 低、 EC_e 较低,从而枸杞的成活率(94.7%)和保存率(87.3%)都较高;也正是因为西南部枸杞的保存率高,植株生长旺盛,蒸腾耗水量高,使得 2015 年西南部地下水位和 EC_w 显著降低。从而进一步说明,在地下水浅埋地区,可以通过种植枸杞等耐盐碱的多年生林果,利用其生长耗水来降低地下水位。

3 讨 论

修建排水系统控制地下水位,防止盐分在上层土壤中集聚,是低洼盐碱地常用的开发治理技术,在我国新疆、宁夏、甘肃等干旱半干旱地区以及黄淮海平原等地的盐碱地开发治理中发挥了巨大作用。但是这些技术在水平排水困难的地下水浅埋区需要修建大型高标准排水系统,投资费用高而难

以实施。种植耐盐碱植物、灌排种稻等方法,也往往因地下水矿化度高,作物经济产量低而难以发挥成效。康跃虎研究团队研究出“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式,在河套灌区低洼重度盐碱撂荒地上应用,当灌溉水矿化度高达 $7.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,枸杞生长良好,产量接近良田水平,并且枸杞大部分品质指标优于特优水平^[14]。该技术模式为水平排水困难的地下水浅埋区盐碱地治理开发提供了新思路。但研究也发现该技术模式没有从根本上改变重度盐碱地土壤类型,仅改变了盐分在剖面中的分布;长期持续滴灌淋洗,在距滴头水平距离 0~30 cm 范围内土壤脱盐显著,盐分在未覆盖的垄坡表层土壤中累积。分析可知这主要是因为试验区面积有限,而周边为引黄漫灌区,导致试验区土壤环境受周边区域灌溉排水排盐的影响显著。

采用上述“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式开发利用试验区周边的 133 hm^2 重度盐碱撂荒地,项目实施 3 年中环境变化的研究发现,研究区内年浅层地下水埋深、浅层地下水电导率和土壤饱和泥浆提取电导率明显受周边及研究区的灌溉、降雨等的影响,但是随着枸杞种植年限的延长,植株蒸腾耗水的增加,整个研究区的浅层地下水埋深逐年降低、浅层地下水电导率和潜层地下水电导率逐年同步降低,土壤饱和泥浆提取电导率也逐年降低。

由此说明,在地下水浅埋重度盐碱地上,种植耐盐碱作物,抽取地下水进行灌溉,通过植株生长耗水可以显著降低地下水位,同时还可以降低浅层地下水矿化度和土壤盐分。显然田间排水沟道对于区域排水、排盐也发挥着重要的作用。如何量化生物的排水排盐量、排水沟道的排水排盐量,是我们下一步需要重点研究的内容。

4 结 论

1)研究区地下水埋深明显受灌溉、降雨等的影响,呈现出由浅逐渐变深之后又变浅的周年变化规律。3 月份春灌后,浅层地下水埋深浅;随着枸杞的生长发育,不断地抽取潜层地下水进行灌溉,浅层地下水埋深会逐渐加深;11 月初冬灌后,浅层地下水位显著抬升。随着枸杞种植年限的延长,研究区浅层地下水埋深逐年降低。

2)研究区浅层地下水电导率 EC_w 显著受灌溉、降雨等的影响。在项目执行的初年,呈现出由低变

高又逐渐变低再升高的周年变化规律。种植枸杞后,初次较大的灌水量将垡体的土壤盐分大量淋洗到地下水,引起 EC_w 升高;6—9 月枸杞生长季因灌溉水电导率较低,以及雨季降雨等的影响, EC_w 逐渐变低;11 月初冬灌将整个垡体尤其是垡坡上的土壤盐分都淋洗到了地下水,从而又引起 EC_w 的升高。随着枸杞种植年限的延长,研究区 EC_w 不断降低,且空间变异性显著降低。

3)随着项目执行期及枸杞种植年限的延长,研究区潜水层地下水电导率 EC_i 不断降低,并且在区域分布上趋于均匀。2015 年 EC_i 降低了 42.9%, 2016 年 EC_i 降低了 37.6%。

4)年内 EC_e 显著受灌溉等的影响。灌溉阶段 EC_e 不断降低,9 月份枸杞落叶停止灌溉后, EC_e 显著升高,冬灌后又明显降低。随着枸杞种植年限的延长,研究区平均 EC_e 不断降低,并且在区域分布上趋于均匀;0~40 cm 土层土壤由极重度盐土转变为重度盐土。

5)研究区枸杞平均成活率为 75.4%,保存率为 67.5%。地下水埋深较深的西南部,枸杞生长季 EC_w 低、 EC_e 较低,枸杞的成活率(94.7%)和保存率(87.3%)都较高;高的枸杞保存率、旺盛的植株生长力和蒸腾耗水量,使得西南部年际间地下水位显著降低, EC_w 值也显著降低。

综上所述,在干旱半干旱水平排水困难的低洼重度盐碱地上,采用“咸水滴灌+高垄+覆膜”滴灌水盐调控技术模式种植枸杞等耐盐碱的多年生林果,通过其生长耗水可以显著降低整个区域的浅层地下水位,浅层地下水电导率 EC_w 和 EC_e 也逐年降低。

参 考 文 献:

[1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J]. 生态学报, 2016, 36 (22): 7059-7063.

[2] 雷晓萍,刘晓峰.宁夏银北地区盐碱地综合改良治理对策[J]. 中国工程咨询,2016, (8): 53-55.

[3] 窦超银,康跃虎. 地下水浅埋区重度盐碱地不同滴灌种植年限土壤盐分分布特征[J]. 土壤, 2010, 42(4): 630-638.

[4] 窦超银,康跃虎,万书勤. 地下水浅埋区重度盐碱地覆膜咸水滴灌水盐动态试验研究[J]. 土壤学报, 2011, 48 (3): 524-532.

[5] 窦超银,康跃虎,万书勤,等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (3): 44-51.

[6] 窦超银,康跃虎,莫家玉,等. 地下水浅埋区重度盐碱地滴灌不同种植年限对土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42 (5): 807-814.

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[8] Jia J S, Kang Y H, Wan S Q. Effect of soil matric potential on wolfberry (*Lycium barbarum* L.) yield, evapotranspiration and water use efficiency under drip irrigation [J]. African Journal of Agricultural Research, 2013, 8(44): 5455-5463.

[9] 杜宇旭,王建东,鲍子云,等. 覆膜滴灌下枸杞耗水规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 166-170.

[10] 梁丽青,王志,杨珊珊,等. 冻层融冻过程地下水位变化影响分析[J]. 中小企业管理与科技旬刊, 2016, 20(7): 168-169.

[11] 尚松浩,雷志栋,杨诗秀,等. 冻融期地下水位变化情况下土壤水分运动的初步研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15 (2): 64-68.

[12] 徐利岗,杜历,汤英,等. 干旱区枸杞蒸腾耗水变化特征及其影响因子响应分析[J]. 干旱区地理(汉文版), 2016, 39 (6): 1282-1290.

[13] 李怀有. 苹果树耗水规律及节水灌溉技术研究进展[C]// 节水高效农业理论与技术.北京:中国农业科技出版社,2004.

[14] 窦超银. 咸水滴灌对重度盐碱地土壤环境及土地生产力的影响[D]. 北京:中国科学院,2011.