

盐渍农田“地下水效益区间”的内涵、研究重点及展望

赵英^{1,2}

1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264039

2. 鲁东大学现代农业高质量发展产教融合东营基地, 东营 257509

摘要 以地下水-土壤-植物-大气连续体系统水盐迁移过程为研究对象, 解析了地下水文过程和农田生态系统的关键驱动因素和互馈过程, 提出了地下水效益区间的新概念; 详述了地下水效益区间的形成机制及其模型模拟方法; 从盐渍农田水盐耦合运移机制、尺度效应、量化模型、地下水位调控等方面展望了地下水效益区间研究的科学问题及其挑战。

关键词 地下水效益区间; 地下水-土壤-植物-大气连续体; 模型模拟

土壤盐碱化问题是当前全球变化研究框架下的重要内容, 盐碱地的治理与农业利用技术研发、应用和产业发展已经成为国内外研究的热点^[1-5]。我国近年来一直致力于土壤盐渍化防治, 华北平原盐渍农田面积显著减少, 而东部滨海区黄河三角洲盐渍问题仍很突出, 主要原因是该区地势低平, 深受海水顶托作用, 地下水位浅且矿化度高^[2, 6]。已知全球约有22%至32%面积的陆地植物其根区接近或在地下水之内^[7]。因此, 地下水对地上生态系统蒸腾耗水和净初级生产力的影响显著^[8-11]。在全球平均水平上, 地下水对植被耗水的贡献率约为23%^[12]; 在地下水浅埋区, 地下水贡献植被蒸腾总量的比例高达84%^[13], 在干旱区, 植被耗水几乎全

部来自地下水^[14]。然而, 在地下水位较浅的灌溉农业区或沿海地区, 由于地下水矿化度高, 地下水对蒸腾的贡献偏小, 甚至产生负面影响^[15]。当前, 由于缺乏观测资料以及模型中未包含这些过程, 无法充分阐明盐胁迫条件下地下水对作物生产力的影响^[16-18]。随着农业种植面积的扩大, 淡水资源供给越来越不足, 农业用水开始转向利用地下咸水、或者咸淡结合进行灌溉, 同时发展适合于该区的节水灌溉技术和水利工程措施。由此, 在地下水浅埋区进行盐渍土改良利用和合理开发, 亟需厘清农业生态系统和地下水文过程的互馈机制, 解析如何将地下咸水作为资源, 变限制为潜力, 寻求基于地下水优化调控的理论依据和方法。

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-12-24

基金项目: 山东省自然科学基金杰出青年项目(ZR2019JQ12); 泰山学者青年专家项目(201812096)

作者简介: 赵英, 教授, 研究方向为土壤水文过程及其调控, 电子信箱: yzhaosoils@gmail.com

引用格式: 赵英. 盐渍农田“地下水效益区间”的内涵、研究重点及展望[J]. 科技导报, 2023, 41(20): 55-63; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.20.006

1 “地下水效益区间”的内涵

1.1 区域地下水盐迁移驱动要素

在滨海带盐碱地,水盐迁移受到多种自然因素,如气候、土壤、水文地质条件、地下水位、地形以及地理位置等的影响。越近海的区域,由于海拔低、海水入侵严重、地下水埋深浅且矿化度高、成土母质含盐量高等原因,造成土壤含盐量高、结构性差、返盐快(图1)。通常,为防止土壤盐渍化发生,必须将地下水控制在临界水位以下^[6, 19-20]。当前,科学界对临界地下水位缺乏公认的界定和量化方法,因此本文定义为:不引起土壤次生盐渍化的地下水位高限。显然,临界地下水位依赖于土壤和地下水类型乃至气候蒸发潜力,也与盐渍化分类标准有关。以黄河三角洲盐碱地为例,利用气象数据和地下水动态监测数据,理解该区普遍存在的春旱夏渍和年际降雨特征的耦合关系,探明不同气候年型地下水位变化规律,探讨防止干旱和渍水环境发生的地下水动态过程;进一步通过不同土壤类型区土壤剖面水盐和地下水动态监测,探明浅地下水位条件下土壤水—地下水交互作用过程;从而阐明降雨入渗深度及其对土壤盐分的淋洗作用,以及潜水蒸发与土壤盐分积聚的动力学机制,明确区域不同土壤条件下地下水上升高度,界定导致土壤盐分积累的区域临界地下水位。当前,随着农业种植面积的扩大,淡水资源供给越来越不足,农业用水开始转向利用地下咸水、或者咸淡结合进行灌溉,同时发展适合于该区的节水灌溉技术和水利工程措施。

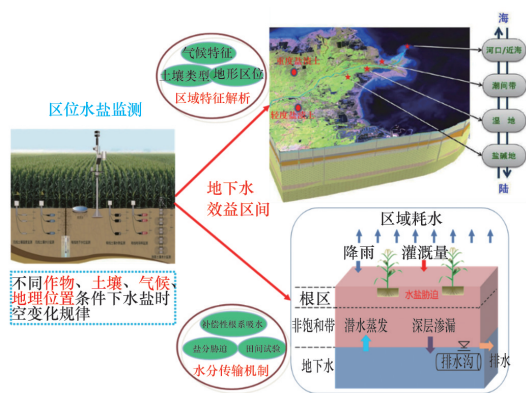


图1 区域水盐运移监测和地下水效益区间量化示意

由此,亟需深入研究引黄灌溉和浅地下水位双重因素影响下盐渍农田土壤水盐动态平衡特征,从而进行区域地下水调控。

1.2 盐渍农田GSPAC系统水分传输机制

国内外已对土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统水分传输机制进行了大量研究,相关理论比较成熟。然而,这些研究没有充分考虑地下水的作用,无法明确地下水—土壤—植物—大气连续体(GSPAC)系统水分传输机制。近年来越来越多的研究尝试建立浅层地下水与植被的生理和物候过程之间的关系,从而明确临界地下水位,但迄今为止仍缺乏对这种关系的数学表达和田间验证^[10]。特别是在咸地下水区,盐分胁迫限制了作物水分利用率,尚不能准确量化地下水对土壤根区的补给以及对土壤蒸发和作物蒸腾的贡献大小^[6]。在干旱的年份,植物通过利用地下水减少水分胁迫对CO₂固定的影响,增加净初级生产力(NPP),由此植物由于地下水浅而增加的蒸腾量很明显。Lowry等^[21]把这种植物从浅层地下水中蒸腾出的额外水定义为“地下水补贴”,计算为浅层地下水条件下的根系吸水与自由排水条件下的差值。进一步,Zipper等^[10]把该额外水所形成的产量定义为“地下水产量补贴”。Soylu等^[22]利用AgroIBIS-VSF模型量化了年度地下水补贴和NPP变化,发现无论生长期降水量如何,地下水位为1.5~2 m时可提供最大的地下水补贴,在此被描述为最佳地下水位(或范围)。然而,当前AgroIBIS-VSF模型研究是在非盐碱地进行,而在地下水盐分含量高的地区,作物根区的盐分环境影响地下水利用潜力,限制了该理论框架在地下咸水区的适用性。

1.3 “地下水效益区间”的定义

地下水的利用程度主要受到根区盐分累积、水盐阈值(不同作物根系盐分耐受程度不同)和淋洗方案的影响,明确合理的地下水位并进行优化调控非常重要。图2示意了通过地下水产量补贴框架研究氧气和水分胁迫条件下地下水与对农作物产量的影响:(1)在干旱年份,浅层地下水将通过减轻水分胁迫来提供地下水产量补贴,但在湿润年份会通过增加氧胁迫而导致地下水产量损失;(2)相

对于粗质土, 细质土由于增加氧气胁迫和更多水分存储, 最佳地下水位会向深层移动(即离根系距离变大)。换言之, 对于进气压力值较低的粗质土, 根部必须相对靠近地下水位方能提供地下水产量补贴。理论上, 在农业生态系统中, 通常有一最佳的地下水位, 对维持农田生产力最为理想; 但由于影响地下水的因素非常复杂, 通常难以将其量化, 需要系统的试验才能确定。此外, 在咸地下水区, 为防止土壤盐渍化发生, 还必须将地下水控制在临界水位以下^[15, 20]。比较而言: (1) 临界地下水位是防止土壤盐渍化的指标, 最佳地下水位是实现地下水补贴最大化的指标; (2) 如果说临界地下水位是一个基于土壤毛细管理论的水文学参数的话, 最佳地下水位则为一个基于作物根系吸水的农学参数; (3) 与土壤控盐相关的临界地下水位是一个定值, 而与地下水产量补贴相关的地下水位是一个范围(且随着作物生根模式和根区水盐环境的时间演进而变化)。由此, 如果要兼顾土壤控盐和地下水补贴, 则需将地下水位调控在临界地下水位以下和地下水产量补贴重叠的区间, 这里将其定义为“地下水效益区间”。由此可见, “地下水效益区间”指标不仅可以用来量化盐分胁迫条件下地下水对农田生态系统生产力的贡献潜力, 还可作为 GSPAC 系统地下水调控的理论标准。

1.4 “地下水效益区间”的量化

当前, 科学界对临界地下水位(h_0)缺乏公认的界定和量化方法, 这里我们定义为: 不引起土壤次生盐渍化的地下水位高限, 可通过土壤基于地下水上升的蒸发量(E)计算:

$$E = \begin{cases} E_p \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^n \left(1 - \frac{\varphi - \varphi_r}{\varphi_0 - \varphi_r}\right), & h < h_0 \text{ and } \varphi < \varphi_0 \\ 0, & h < h_0 \text{ and } \varphi \geq \varphi_0 \\ 0, & h \geq h_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_p 为潜在蒸发量, h 为地下水位, φ 为电导率, φ_0 为临界地下水位对应的电导率, φ_r 为盐分开始胁迫的阈值, n 为参数。显然, 临界地下水位依赖于土壤和地下水类型乃至气候蒸发潜力, 也与盐渍化分类标准有关。

从地下水产量补贴的角度, 需要将地下水位调整到最佳地下水位附近(地下水产量补贴边界^[10]), 使得作物蒸腾量最大化, 可通过作物基于地下水补偿的蒸腾量(T)计算:

$$T(h, \varphi, z, t) = \alpha(h, \varphi, z, t) \beta(z, t) T_p(z, t) \quad (2)$$

式中, z 为土壤深度, t 为时间, α 为地下水影响范围内作物根区水盐胁迫函数, 在模型中(如 HYDRUS)通常认为是水分胁迫函数(α_h)和盐分胁迫函数(α_φ)的乘积。

胁迫函数可通过以下公式计算:

$$\alpha_h = \begin{cases} 0, & h \geq h_{\max}, h \leq h_{\min} \\ \frac{h_{\max} - h_c}{h_{\max} - h_c}, & h_c < h < h_{\max}, h = h_c \\ \frac{h - h_{\min}}{h_c - h_{\min}}, & h_{\min} < h < h_c \end{cases}$$

$$\alpha_\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_\varphi}{h_{\varphi 50}}\right)^p} \quad (3)$$

式中, h_c 、 h_{\max} 、 h_{\min} 分别为最佳地下水位以及地下水补贴最大和最小边界, h_φ 为溶质势, $h_{\varphi 50}$ 为 van Genuchten 盐分胁迫函数中胁迫导致吸水速率减小 50% 时的溶质势, p 为参数。

方程(2)中 T_p 为潜在蒸腾量在根区 β 的分配, 其和方程(1)中的 E_p 共同构成田间潜在蒸散量, 可通过下式计算:

$$E_p(t) = ET_p(t) \cdot \exp^{-k \cdot LAI(t)} \quad (4)$$

$$T_p(t) = ET_p(t) - E_p(t)$$

式中, ET_p 为潜在蒸散量, 通常用 Penman-Monteith 公式计算; k 为消光系数, LAI 为叶面积指数。

根据定义, “地下水效益区间(Δh)”为临界地下水位以下和地下水产量补贴重叠的区间(如图 2 黄色加号区域所示), 其数学表达式为:

$$\Delta h = \begin{cases} 0, & h_0 < h_{\min} \\ h_0 - h_{\min}, & h_{\min} \leq h_0 \leq h_{\max} \\ h_{\max} - h_{\min}, & h_0 > h_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

基于以上计算公式, 本研究提出的地下水效益区间物理意义明确, 以之为地下水调控的理论标准, 不仅可以据此创建目标地下水位, 并方便于明确具体管控措施来实现地下水位调整。尽管以前

有的研究定义临界地下水位时也考虑了盐分对植物的影响,类似于适合作物生长的地下水位动态变化范围,但由于作物类型-土壤盐度-地下水深度之间的复杂耦合关系,通常缺乏像公式(5)一样的量化指标和方法,难以直接应用^[20]。比较而言,在不受盐分影响条件下,本文的地下水补贴最小边界类同于潜水蒸发(包括土壤蒸发和根系吸取地下水)极限埋深,而地下水补贴最大边界相当于毛细水上升高度。需要特别强调的是,类似于临界地下水位和最佳地下水位只定义了垂直方向上水位的特点,本研究所定义的地下水效益区间也仅限于垂直方向,暂不考虑其在水平方向上的变化(图2,参考 Zipper 等^[4])。

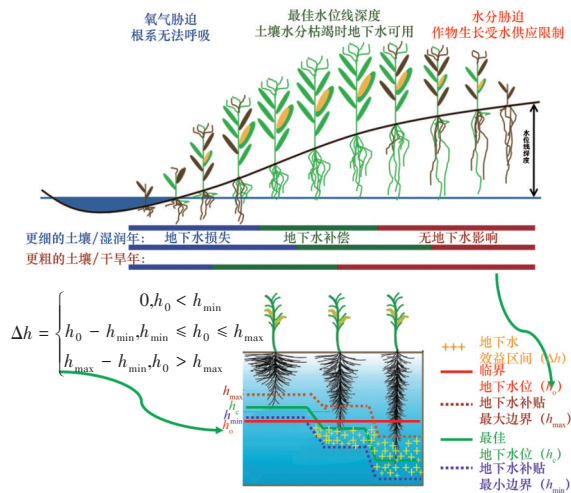


图2 浅地下水位区作物-地下水互馈关系以及地下水效益区间定义概念图

2 “地下水效益区间”的研究重点

2.1 咸地下水区水盐耦合运移规律

为了实现地下水浅埋区农业水分高效利用并进行调控,亟需深入研究灌溉和浅地下水位双重影响下的作物生长过程,阐明地下水与地上农田生态系统的互馈机制。土壤水文不仅决定着物质和能量在土壤中的存储、转化与迁移,也决定着GSPAC系统物质输移循环^[23]。然而,土壤水文过程主要侧重非饱和区,对于土壤水与地下水的交换,地下水

运动与溶质迁移等相关研究较弱。地球关键带研究拓展了农田生态系统与地下水文过程的研究范畴,强化了土壤物理过程在陆地表层系统剖面、坡面和流域等多尺度物质运移、循环中的重要作用^[24]。通常,地下土壤水盐过程对盐碱土区生物地球化学循环具有决定性的影响,地下水盐过程与生物地球化学交叉方向的发展,对于描述地下水盐输移循环机制并模拟其通量,具有重要意义^[25]。进一步,传统土壤水文主要关注土壤特性对水分和物质迁移等非生物过程的影响,而农业水文则以水分对作物生长发育等生物过程的影响为出发点,侧重于研究农业措施和农业工程方面的各种水文现象的发生规律及其内在联系。包气带中水分作为连接土壤生物过程和非生物过程的介质,也因此成为了土壤水文和农业水文交叉的桥梁。当前,如何利用土壤水文学和农业水文学的理论和方法,确定地下水浅埋区临界地下水位,以及其与土壤、气候和地下水类型的定量关系,将为农业生态系统与地下水文耦合过程和机理研究提供巨大动力^[26]。在这方面,本研究提出的“地下水效益区间”新概念是一个非常好的尝试,可在理解水文运移规律的基础上,进一步结合作物根-氧-水-盐相互作用机理的解析,系统阐明盐碱农业生态系统与地下水盐过程互馈机制,并为合理的水盐调控措施奠定基础。

2.2 盐渍农田水盐运移过程的尺度效应

事实上,由于土壤空间结构的变异性和影响水盐运动各因素的随机性,水盐运移过程存在极强的尺度性,并对应着在该尺度范围合适的量化技术和方法。当前,示踪技术,如同位素、地球化学离子和稀土元素在追踪物质在GSPAC系统中迁移转化路径方面非常有效^[27-30]。新近热门的地球关键带研究主要着眼于在学科、尺度和资料间进行有效的联结,实现微观尺度(土壤微颗粒和团聚体)、中尺度(土体、田块或土链)和宏观尺度(流域、区域或全球)的相互转换^[19]。它可以根据土壤制图分级系统把景观尺度上的土类分布或土壤性状进行空间内插和聚合、进而进行尺度上推和尺度下推;也可以通过土壤模型的分级结构与不同尺度的典型土壤过程建立关系进行尺度转化。例如,从中尺度到宏

观尺度,可以结合地形变化和土地利用方式构建“表征单元区域”,从而把实验室和田间测定的水力特性和流域尺度的水力特性有机地联结起来进行空间尺度的转化。目前,越来越多的研究采用数据同化方法,以水盐运移模型作为模型算子,以大尺度观测数据作为驱动数据,采用同化算法将观测数据同化到模型中,提高土壤盐渍化演变规律的预测能力。特别是,近年来气候变化、水资源短缺以及极端气候频繁,亟需研究地下水效益区间的驱动机制及其影响因素的尺度效应,同时呼应当前比较先进的物联网、大数据、人工智能和云平台技术,研发变化环境下流域水资源优化配置方案,建立先进的区域地下水资源综合管理体系。

2.3 GSPAC 系统水盐耦合运移模型

当前,已建立了许多 GSPAC 系统水盐耦合运移过程的数值模拟软件(如 HYDRUS、RZWQM、EPIC、SVAT、SHAW 等^[31]),其中 HYDRUS 模型被广泛应用^[32],特别是其基于可动、不动水体的概念引入了能模拟大孔隙流和优势流的双孔隙模型,并将这些水文特征参数和溶质反应进行了组合,可进行物理非平衡和化学非平衡溶质运移的模拟(如两区模型、两点模型等),这为区域影响因素较多(如地下水、灌溉水)、土壤剖面特征复杂(如黏土夹层、砾石、大孔隙)条件下水盐迁移模型模拟提供了方便^[33-35]。然而,当前水盐运移机理模型在土壤非饱和区的研究比较透彻,但在饱和-非饱和区则明显不足,尚未阐明地下水对植物功能的影响。反过来,大量作物模型虽擅长于模拟作物生长过程(如 RZWQM、WOFEST、DSSAT、AquaCrop 等^[36]),但对于土壤水文过程的表达不足,尤其是缺乏模拟地下水的的作用。由此,近年来更多的方法是水文模型和作物模型进行耦合,如 HYDRUS-1D 同作物模型 AgroIBIS 耦合而成的 AgroIBIS-VSF 模型^[22]。值得一提的是,尽管目前有一些作物模型能够在一定程度上模拟地下水与植被的关系,但像 AgroIBIS-VSF 模型一样能够描述地下水动态对土壤温度、缺氧和叶片微气候条件影响的机理模型非常缺乏。近年来越来越多的研究尝试建立浅层地下水与植被的生理和物候过程之间的关系,从而明确临界地

下水位,但迄今为止仍缺乏对这种关系的数学表达和田间验证^[6]。Zipper 等^[10]发现浅层地下水位、根长密度分布和根系吸水补偿效应(即植物通过从根部胁迫较小的部分吸收更多的水分来适应干旱条件,以补偿在胁迫较大的区域减少的根部水分吸收的机制^[37])对蒸腾和 NPP 影响显著,强调了模型研究中纳入根系补偿性吸水方程的重要性。

2.4 水盐运移过程多尺度模拟

以上田块尺度 GSPAC 系统水盐运移模型虽然机理方面考虑比较全面,但水盐运移过程尺度性极强、影响因素空间变异大,尤其是调控土壤水盐变化的措施诸如灌溉、排水、农艺措施等多在大尺度进行,田块尺度的模型多为一维,无法进行大尺度水盐过程分析与评价^[38]。另一方面,传统的大尺度水文模型如 MODFLOW,虽然其擅长于大尺度不同景观单元土壤水-地下水交互作用以及地下水运动过程研究,但由于其缺乏田块尺度土壤层次和详细结构参数,又无法反映小尺度的土壤饱和-非饱和区水文过程^[39]。由此,模型发展的又一趋势是将不同尺度模型进行耦合,如 HYDRUS-1D 模型和地下水模型 MODFLOW 耦合而成的 HYDRUS+MODFLOW^[40],将地下水动态条件下土壤水盐迁移过程的模拟拓展到了区域尺度,可计算自然、人为等多种因素影响下水分和盐分在土壤中的再分配过程。进一步,Zipper 等^[41]将最新版的 AgroIBIS-VSF 模型(即 AgroIBIS 和 HYDRUS-1D 的耦合)和 MODFLOW 模型结合,构建了一个新的模型框架 MODFLOW-AgroIBIS(MAGI),能够根据环境条件模拟植被生长动态,量化水和能量在 GSPAC 系统的运动(图 3^[20])。然而,当前 MAGI 模型相关工作大多在非盐碱地进行,而在地下水盐分含量高的地区,作物根区的盐分环境将影响地下水利用潜力,限制了该模型框架的适用性。这意味着在盐碱农业中使用模型计算地下水产量补贴,必须将盐分的影响纳入考虑,进行模型的改进。

2.5 盐渍农田土壤水文过程与养分高效利用

土壤养分是作物生产力形成和农产品品质的重要限制性因素。土壤养分生化动力学转化、物理迁移、植物吸收利用等过程都与土壤水文过程密切

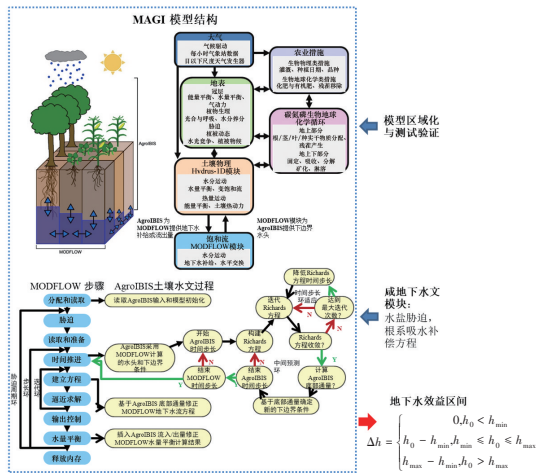


图3 考虑咸地下水的MAGI模型研究框架示意

相关。盐渍农田土壤受制于自然人为环境下的非稳态土壤盐分环境变化压力,土壤水文过程和养分生物地球化学过程的关系高度复杂,使得一些传统的土壤学概念难以明确地解释盐渍农田系统水文、化学、生物环境要素的作用关系,造成现有一些水分调控和养分高效利用关键技术在盐渍农田的应用困难。因此,深入研究盐渍农田土壤水文过程与养分生物地球化学循环过程之间的耦合关系,深化理解不同水盐环境压力与调控模式下养分在GSPAC系统中的迁移和转化规律和控制机理,明确养分在GSPAC系统中对水盐过程的反馈调节作用,研发不同水盐调控模式下(如地下水效益区间的调控)养分高效管理与利用的技术与模式,势必在未来盐渍农田农业高质量发展和生态平衡方面发挥巨大的实践指导作用。需要注意的是,盐渍农田开发利用过程中高强度的灌溉排碱压盐、过量化肥输入会造成土壤氮磷的大量累积、氮磷淋溶和流失量增加,引发地下水硝态氮超标和水体富营养化等生态与环境问题^[42-43]。因此,采用何种方法和在多大程度上综合调控土壤水文过程和养分生物地球化学过程,使得处于类“自然”非平衡状态的盐渍农田生态系统不至于滑向生态环境质量恶化状态,将是未来盐渍农田土壤水文和养分耦合过程调控方法和理论研究的最大挑战之一,但也是拓宽传统土壤水文学和农业水文学范畴和更新盐渍农田水分养分调控管理与水土污染防治概念的新机遇。

2.6 “地下水效益区间”调控

对于浅地下水区盐渍农田,控制水位是关键。当前,通常使用明沟、暗管等控排方法降低地下水位,提高引水和灌水土壤脱盐效率^[44-46]。总体而言,这些调控方法需结合不同作物盐分阈值以及当地土壤类型和地下水状况,明确其在盐碱农业生产中的适用性。内蒙河套灌区、宁夏引黄灌区在水盐调控方面做了较多工作,但基于地下水效益区间概念利用模型进行调控参数计算,从而进行地下水优化调控的研究并不多见^[47]。尽管目前有一些模型提出了针对某些作物的适当地下水位和灌溉策略^[48],但由于不同的土壤类型、灌溉制度、植物生根模式、盐分耐受度、地下水位深度以及气候条件,很难对结果进行推广和概括。通常,为了弥补田间试验周期长、分析因子少等限制,可基于模型因子试验,综合考虑不同因子组合对地下水位和作物产量关系的影响,从而基于情景分析功能提出水盐调控技术参数。当前,可通过不同管理措施下获取的边界条件及其影响特征参数,应用GSPAC系统水盐运移模型,预测农田水盐动态和累积趋势,系统分析不同的灌溉制度和种植模式下作物生长状况对土壤水盐环境变化的响应^[49]。在此基础上,利用情景分析功能,设计不同的影响要素组合,明确节水措施和盐分淋洗的平衡点,建立以节水控盐为目标的植物水分定量供应理论方案。由此,可基于模型构建反映不同调控措施的技术参数来调控地下水效益区间的关键因素。此外,也可以基于这些技术参数设计土壤改良产品。例如,通过现代仪器分析手段,对产品进行结构形貌表征,探讨其分子结构、表面形貌等与土壤水肥保蓄性能间得相关性,建立构-效关系,从而进行组分筛选-结构调控-保肥性能测定的材料设计与优化,提出盐碱土壤水盐调控的最优技术产品。

3 “地下水效益区间”研究的主要科学问题

围绕盐渍农田生态系统和地下水文过程的交互作用,提出了“地下水效益区间”新的概念和指

标,需要进一步拓展和延伸。通过田间监测和模型模拟相结合的方法,下一步亟需研究以下问题。

第一,如何确定咸地下水区临界地下水位,及其与土壤、气候和地下水类型的定量关系?这方面需要利用土壤水文学和农业水文学的理论和方法,重视盐碱农业用水和地下水-土壤水作物承载力的研究。一方面,外界气候通过土壤温度、质地和容重等物理性质,影响土壤和地下水运动和土壤生物活动^[25]。另一方面,地下水、土壤水分运动分布通过调控土壤氧气含量,作用于氧化还原环境和微生物活动,从而影响生物地球化学循环^[50]。因此,地下水盐过程与生物地球化学交叉方向的发展,对于描述地下水盐迁移机制并模拟其通量,具有重要意义。

第二,如何基于土壤物理过程和作物生长动态田间试验数据,研究某一区域某一作物体系最佳地下水位,并进一步构建 GSPAC 系统水盐运移模型,计算地下水效益区间?理论上,有关地下水补贴和地下水效益区间等概念主要针对非盐渍化区域,将之直接引入盐渍化区域应用效果如何仍需进一步测试。值得注意的是,地下水补贴的概念不仅是从潜水区提取的水,而是包括土壤毛细管边缘的根系吸水。由此,地下水产量补贴的计算通常需要分别模拟存在浅层地下水的情况下和自由排水条件下的植物用水,得到两者的差值,这是本研究模型应用的一个重要方面。此外,根区水分吸收是 GSPAC 模型中考虑的最重要过程之一,模拟了植物吸收利用土壤水和地下水的程度,从而决定了土壤水渗漏或者地下水补给的水流量^[51]。当前,已经开发了许多具有不同假设、复杂性的根系吸水模型,主要挑战是缺乏可用于参数化根系吸水功能关系的数据、以及对重要过程的数值表达^[42]。

第三,作物生长如何应对地下水变化,在此过程中盐分胁迫、根系分布和根系吸水补偿效应的影响机理如何?在作物生长模型中考虑根系吸水补偿机制可改善对土壤含水量的预测,但在目前参数测量和模型的发展中,当存在盐分胁迫时,如何参数化根系补偿性吸水过程仍不清楚(图3)。这方面如何运用新技术与新方法,解析地下水盐过程与土壤生产力、生态环境安全等功能的互馈关系,优

化和提升生态系统服务功能,值得深入研究。近年来,同位素技术成为研究植物水资源利用的重要且行之有效的方法^[51-52],这为揭示 GSPAC 系统土壤水与溶质运移机制提供了借鉴。此外,茎流计测定液流和根系扫描仪量化根系生长动态(根长和根系分布)的最新测量技术也为土壤-根-水相互作用机理研究提供了条件。

第四,如何将模型情景分析和田间调控措施试验相结合,提出区域水盐调控技术参数并进行地下水位优化调控方案制定?情景分析的优势可以根据不同区域土壤质地和生长期气候条件和作物产量的关系,系统阐明浅层地下水位提供地下水补贴或造成负效应的作用区间,从而为人工创建目标地下水位提供调控参数。这方面如何利用土壤物理模型预测地下水盐过程变化对于未来粮食生产和生态环境的影响,以制定和评估咸地下水区盐碱农业可持续发展的调整策略,是未来的研究重点和难点。特别是,近年来气候变化、水资源短缺以及极端气候频繁,亟需发展作物生境过程调控理论与模型^[53]、研究非饱和带水盐迁移过程、驱动机制及其尺度效应,微咸水/咸水、农田排水等非传统水资源在盐渍土安全利用及其生态效应等。

参考文献(References)

- [1] FAO, ITSP. Status of the World's Soil Resources (SWSR)-Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils[M]. Italy: Rome, 2015.
- [2] 杨劲松,姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(Suppl): 162-170.
- [3] Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world[J]. Nature, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [4] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1): 1-20.
- [5] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: A review[J]. Land Degradation & Development, 2000, 11(6): 501-521.
- [6] Fan X, Pedroli B, Liu G, et al. Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(2): 175-189.
- [7] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth[J]. Science, 2013, 339(6122): 940-943.

- [8] Fan Y. Groundwater in the Earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3052–3069.
- [9] Good S, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 175–177.
- [10] Zipper S C, Soyly M E, Booth E G, et al. Untangling the effect of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6338–6358.
- [11] White W N. A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil: Results of investigations in Escalante Valley, Utah, U.S. Geol. Surv[J]. *Water Supply*, 1932, 659: 105.
- [12] Evaristo J, McDonnell J J. Prevalence and magnitude of groundwater use by vegetation: A global stable isotope meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4110.
- [13] Zhao Y, Qi J, Hu Q L, et al. Soil science-emerging technologies, global Perspectives and applications. The "Groundwater Benefit Zone", proposals, contributions and new scientific issues[J]. *IntechOpen*. 2021, doi: 10.5772/intechopen.100299.
- [14] Yuan G, Luo Y, Shao M, et al. Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(6): 1032–1042.
- [15] Gao X Y, Huo Z L, Qu Z Y, et al. Modeling contribution of shallow groundwater to evapotranspiration and yield of maize in an arid area[J]. *Scientific Report*, 2017, 7(1): 43122.
- [16] Xue J Y, Huo Z L, Wang F X, et al. Untangling the effects of shallow groundwater and deficit irrigation on irrigation water productivity in arid region: New conceptual model[J]. *Science of Total Environment*, 2018(619/620): 1170–1182.
- [17] Zipper S C, Soyly M E, Kucharik C J, et al. Quantifying indirect groundwater-mediated effects of urbanization on agroecosystem productivity using MODFLOW-AgroIBIS (MAGI), a complete critical zone model[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 359: 201–219.
- [18] Scanlon B R, Reedy R C, Stonestrom D A, et al. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1577–1593.
- [19] Yang F, Zhang G X, Yin X R, et al. Study on capillary rise from shallow groundwater and critical water table depth of a saline-sodic soil in western Songnen Plain of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2119–2126.
- [20] Ayars J E, Christen E W, Soppe R W, et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: A review[J]. *Irrigation Science*, 2006, 24: 147–160.
- [21] Lowry C S, Loheide S P. Groundwater-dependent vegetation: Quantifying the groundwater subsidy[J]. *Water Resources Research*, 2010, doi: 10.1029/2009WR008874.
- [22] Soyly M E, Kucharik C J, Loheide II S P. Influence of groundwater on plant water use and productivity: Development of an integrated ecosystem: Variably saturated soil water flow model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014(189/190): 198–210.
- [23] Guo L, Lin H. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(9): 1–14.
- [24] Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 974–987.
- [25] 朱青, 廖凯华, 赖晓明, 等. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1150–1158.
- [26] Shang J, Zhu Q, Zhang W. Advancing soil physics for securing food, water, soil and ecosystem services[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17: 180207.
- [28] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [29] Lv Y J, Gao I, Geris J, et al. Assessment of water sources and their contributions to streamflow by endmember mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 411–422.
- [30] Peng X, Zhu Q, Zhang Z, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 81–94.
- [31] Penna D, Geris J, Hopp L, et al. Water sources for root water uptake: Using stable isotopes of hydrogen and oxygen as a research tool in agricultural and agroforestry systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 291: 106790.
- [32] Luo X, Liang X, Lin J. Plant transpiration and groundwater dynamics in water-limited climates: Impacts of hydraulic redistribution[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(6): 4416–4437.
- [33] Šimůnek J, van Genuchten M T, Sejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, doi: 10.2136/vzj2016.04.0033.
- [34] Beven K J. Preferential flows and travel time distributions: defining adequate hypothesis tests for hydrological process models[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12): 1537–1547.
- [35] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 44–51.
- [36] 姚荣江, 杨劲松, 郑复乐, 等. 基于表观电导率和Hydrus模型同化的土壤盐分估算[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 90–101.
- [37] Ding D Y, Feng H, Zhao Y, et al. Impact assessment of climate change and later-maturing cultivars on winter

- wheat growth and soil water deficit on the Loess Plateau of China[J]. *Climatic Change*, 2016, 138(1/2): 157–171.
- [38] Šimůnek J, Hopmans J W. Modeling compensated root water and nutrient uptake[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220: 505–521.
- [39] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 31–35.
- [40] 张旭洋, 林青, 黄修东, 等. 大沽河流域土壤水-地下水流耦合模拟及补给量估算[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 101–113.
- [41] Twarakavi N K C, Šimůnek J, Seo H S. Evaluating interactions between groundwater and vadose zone using HYDRUS-based flow package for MODFLOW[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 9(2): 757–768.
- [42] Zipper S C, Soylu M E, Kucharik C J, et al. Quantifying indirect groundwater-mediated effects of urbanization on agroecosystem productivity using MODFLOW-AgroIBIS (MAGI), a complete critical zone model[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 359: 201–219.
- [43] Sharma P K, Mayank M, Ojha C S P, et al. A review on groundwater contaminant transport and remediation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, doi: 10.1080/09715010.2018.1438213.
- [44] 于一雷, 宋献方, 郭嘉, 等. 黄河三角洲地区地表水化学特征及其主要影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(10): 58–63.
- [45] 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.
- [46] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 II: 模型应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(5): 616–625.
- [47] 李明思, 康绍忠, 杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 49–54.
- [48] Liu Z, Huo Z, Wang C, et al. A field-validated surrogate crop model for predicting root-zone moisture and salt content in regions with shallow groundwater[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2020, 24: 4213–4237.
- [49] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: A review[J]. *Land Degradation & Development*, 2000, 11(6): 501–521.
- [50] Hörtnagl L, Barthel M, Buchmann N, et al. Greenhouse gas fluxes over managed grasslands in Central Europe[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1843–1872.
- [51] Soylu M E, Loheide S P, Kucharik C J. Effects of root distribution and root water compensation on simulated water use in maize influenced by shallow groundwater[J]. *Vadose Zone Journal*, 2017, doi: 10.2136/vzj2017.06.0118.
- [52] Beyer M, Koeniger P, Gaj M, et al. A deuterium-based labeling technique for the investigation of rooting depths: Water uptake dynamics and unsaturated zone water transport in semiarid environments[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 627–643.
- [53] Evaristo J, Jasechko S, McDonnell J J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow[J]. *Nature*, 2015, 525: 91–94.
- [54] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 117–126.

The concept, scientific issues and prospect of the groundwater benefit zone in the saline farmland

ZHAO Ying^{1,2}

1. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China

2. Ludong University Dongying Base of Integration between Industry and Education for High-quality Development of Modern Agriculture, Dongying 257509, China

Abstract This paper focuses on the processes of water and salt movements in the groundwater-soil-plant-atmosphere continuum (GSPAC) system. First, it analyzes the key driving factors and mutual feedback mechanisms of the groundwater hydrological process and farmland ecosystem and proposes a new conception of groundwater benefit zone (GBZ). Secondly, it elaborates on the formation mechanisms of the groundwater benefit zone and the model development for simulation of the GBZ. Finally, based on the saline farmland water-salt coupling transport mechanism, scale effects, quantitative model of GBZ, and technical parameters of regional groundwater and salt regulation and control, the scientific issues and challenges related to the research framework of GBZ are prospected.

Keywords groundwater benefit zone; groundwater-soil-plant-atmosphere continuum; model simulation ●



(责任编辑 祝叶华)