

华北山前平原灌溉农田深层土壤水分 动态特征及渗漏量估算

王茜^{1,2}, 沈彦俊¹, 裴宏伟^{1,2}, 田浩业³, 李放^{1,2}, 裴源生³

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 石家庄 050021;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 以中国科学院栾城农业生态系统试验站的大埋深土壤水分剖面观测设施为依托, 利用中子水分仪对 15.4 m 深度的土壤水分进行连续 1 年的定位观测, 同时通过定期采集深层土壤和水分样品, 对该区土壤水分变动特征和深层入渗量进行了定量研究。结果表明: 土壤水分在垂直剖面上的分布受土壤质地组成控制, 同时在年内受降水事件和灌溉的影响而波动, 随着土壤深度的增加, 土壤水分的变异性呈减弱趋势; 根区土壤水分受降水(灌溉)和作物耗水的共同影响而变化剧烈, 根区以下土壤水分对降水的响应有一定延迟; 在观测期间, 整个 15.5 m 深度的土壤剖面上有水分的盈余, 土壤水贮量增加了 216 mm, 但在小麦生育期土壤水分表现出耗损过程(土壤水贮量减少了 208 mm)。最后利用氯质量平衡法估算 560 cm 深度处渗漏量约为 65 mm。

关键词: 华北平原; 农田; 土壤水分; 土壤水贮量; 渗漏量

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0155-06

Dynamic Characteristics and Drainage Assessment of Deep Soil Moisture in the Irrigated Farmland of Piedmont Region of North China Plain

WANG Qian^{1,2}, SHEN Yajun¹, PEI Hongwei^{1,2}, TIAN Haoye³, LI Fang^{1,2}, PEI Yuanheng³

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology,

Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, the observation equipment of deep soil water profile in the Luancheng ecological experiment station of Chinese Academy of Sciences was used to perform in situ measurements of the soil water content in the depth of 15.4 m of soil profile for one continuous year based on the neutron moisture viewer. The deep soil and water samples were collected regularly, which were used to perform quantitative analysis of the variation of soil water content and deep drainage. The results showed that the distribution of soil moisture in the vertical profile is controlled by the soil texture, and the variability of soil moisture decreases with the depth of soil. Meanwhile, the distribution of soil moisture was affected by the precipitation and irrigation within a year. Due to the effects of precipitation (irrigation) and evapotranspiration, dramatic variations of soil moisture occurred in the root zone. However, the response of soil moisture to the precipitation was delayed below the root zone. During the observation period, there was abundant water for the whole soil profile in the depth of 15.5 m and the soil water storage increased by 216 mm. However, the soil water content decreased in the wheat seasons and the soil water storage decreased by 208 mm. Estimated by the chloride mass balance method, the deep drainage was almost 65 mm in the depth of 560 cm of the soil profile.

Key words: North China Plain; farmland; soil water content; soil water storage; drainage

华北山前平原是我国重要的粮食产区, 主要种植冬小麦 和夏玉米, 两季作物的年产量可达 15 t/hm², 是世界高产地区

收稿日期: 2012-12-27 修回日期: 2012-12-30 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.019.html>

基金项目: 中国科学院创新领域前沿项目(KSCX2-EW-J5)资助

作者简介: 王茜(1987-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤水分过程及地下水补给方面的研究。E-mail: wangqiarznzftz@126.com

通讯作者: 沈彦俊(1971-), 男, 河北康保人, 研究员, 博士, 从事农业水文和水资源研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

之一^[1],提取地下水灌溉是支撑这一高产的重要保障。然而,长期的地下水超采致使该区地下水位连年下降,水资源的不足和因超采造成的地下水位持续下降成为 21 世纪该地区农业可持续发展的主要障碍^[23]。在华北山前平原的大部分地区,农民的灌溉方式以大水漫灌为主,经估算仅有 75% 的水分用于作物生长,其余无效灌溉的水分除蒸发损耗外,将经由土壤层向下渗漏。因此研究山前平原高产农田土壤水分运移规律对于科学制定灌溉方案、有效调控水分,节约水资源和提高农作物产量等均具有十分重要的意义。在华北山前平原区的典型灌溉农田,很多学者针对土壤水分动态变化做过相关的研究^[4-9],但由于取样方法和观测手段的局限性,这些研究多集中在作物根系层深度,对根系层之下的研究较少。因此本文拟对此地区深层土壤水动态做进一步研究,以查明土壤水分在深层剖面上的运移规律与动态特征,为该地区农业的发展及农业用水的合理开发和管理提供相关依据。

1 试验站概况与研究方法

1.1 试验站概况

选择在中国科学院栾城农业生态系统试验站(下文简

称栾城站)进行试验。该站位于北纬 37°53',东经 114°41',海拔 50.1 m,属河北省栾城县境内,地处太行山山前平原中部,种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制:小麦于 10 月初播种,第二年 6 月上旬收割;玉米于小麦收割前 10 天左右套种,9 月下旬收获。研究区土壤类型以潮褐土为主,地势平坦,无地表径流,属于半干旱半湿润季风气候,多年平均降水量 487 mm,称重式蒸渗仪观测的农田实际蒸散量在 800~900 mm 之间,明显高于同期降水量^[10-11]。其中冬小麦生长期降水量仅 130 mm,很难满足作物需水,是主要的灌溉耗水作物。长期抽取地下水导致栾城站的地下水埋深从 20 世纪 70 年代的 10 m 左右下降至目前的 42 m。

在 2011 年 10 月-2012 年 9 月试验期间内,研究区总降雨量为 553 mm,降水保证率为 20.7%,属于丰水年(表 1)。其中冬小麦生育期累积降雨 77.8 mm,属 75% 保证率的偏早年份,占生育期总降雨量的 14.1%;夏玉米生育期降雨 475.2 mm,占生育期总降雨量的 85.9%。灌溉活动发生在冬小麦返青后,分别于 2012 年 4 月 8 日、4 月 27 日和 5 月 27 日对冬小麦进行喷灌,灌水量依次为 96 mm,92 mm 和 104 mm,累计灌水 292 mm。

表 1 试验观测期(2011-10-5 至 2012-9-26)降雨量及多年同期平均降水量(1985 年-2011 年)

Table 1 The precipitation during the observation period (Oct 5th, 2011 to Sept 26th, 2012) and the average precipitation for many years (1985 to 2011)

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计
多年平均降雨量	20.7	13.5	2.8	2.7	4.7	10.3	26.1	39.3	49.6	118.4	112.5	44.7	445.4
观测期间降雨量	14.5	30.0	0.0	0.1	0.0	6.2	18.7	0.0	61.9	213.2	125.2	83.2	553.0

1.2 土壤水分监测

试验小区选取在位于栾城站东侧农田,面积 5 m × 5 m。2011 年夏季对小区内一眼废弃的砖砌井进行改造,建成深层土壤水分动态的观测设施,并于 2011 年 7 月在小区内安装 15.4 m 深的中子仪探管,用来采集土壤样品分析不同深度的机械组成。本试验时间为 2011 年 10 月-2012 年 9 月,历经一个完整的作物年,从 10 月 5 日冬小麦播种开始至次年 9 月末夏玉米收获结束。利用中子仪监测土壤剖面的水分变化,观测频率为每 5 天 1 次,降水和灌溉后加测。观测深度间隔分别为 10 cm(对 1 m 以上土层)、20 cm(1 m 以下土层)。在观测井东南侧埋设有土壤真空提取器 17 支,埋设的垂直剖面深度为 9 m,真空提取器的深度间隔分别为 20 cm(对 2 m 以上土层)、100 cm(2 m 以下土层)。每次降雨(灌溉)后 24 h 内对土壤水分进行采集,采集后的土壤水样品放入 30 mL 聚乙烯瓶中于 4 °C 冰箱内冷藏保存,并尽快送入实验室进行样品前处理和测试。逐日气象数据由栾城站的自动气象站获得,灌溉水量根据灌溉前后 1 m 土层土壤水贮量的差值估算。

1.3 土壤水贮量计算及氯元素质量平衡法

土壤水贮量是指存在于一定面积和厚度的土壤中水分的绝对数量,它等同于相同面积水层的厚度^[12]。由于作物根系对水分的吸收和利用对土壤水分的扰动较大,可以按作物根系层为界将土壤垂直分为上下两部分。不同作物对土壤水利用深度有很大差异,为计算方便,以 200 cm 土壤深度

作为作物根系带^[13]。此外,根据土壤水分分布规律,再将 200 cm 土层细分为 0~40 cm,40~100 cm,100~160 cm 和 160~200 cm。根系层下部土壤深度范围为 200~1540 cm。根据土壤质地划分为 200~560 cm 和 560~1540 cm 两部分。对不同层次分别计算土壤水贮量,计算公式为:

$$D_w = \theta_v \times h \quad (1)$$

式中: D_w 为某深度土层的土壤水贮量(mm); θ_v 为土壤的体积含水率(%); h 为土层厚度(mm)。

采用氯元素质量平衡法估算降雨(灌溉)后土壤水分经由作物根系层向下发生的深层渗漏量。应用氯质量平衡法一般需要基于以下假定^[14]:(1)均质土壤的一维、垂向、活塞流系统;(2)剖面中氯流率在时段内达到动力平衡和完全的稳态,只有地面输入发生季节性的变化;(3)不产生地面径流和壤中流,也不发生大孔隙之类的优先水流;(4)不考虑除降水(灌溉)和干沉降以外的其他氯源;(5)补给计算期降水中氯浓度等同于观测期浓度,年平均降水也相同。据此,研究时段内降水对地下水的补给量为^[15]:

$$R = P \cdot C_p / C_R \quad (2)$$

式中: R 为大气降水对地下水的补给速率(mm); P 为大气降水量(mm); C_p 为大气降水中氯离子浓度(mg/L); C_R 为某一深度土层处下渗水分通量中氯离子的浓度(mg/L)。由于研究区地下水埋藏深,包气带厚,对公式(1)加以修改计算降雨(灌溉)水分入渗后经由某一深度土壤层发生向下渗漏量:

$$D = (P \cdot C_p + I \cdot C_G - \Delta D_w \cdot C_S) / C_R \quad (3)$$

式中: D 为降雨(灌溉)水分经由某一深度土壤层的渗漏量(mm);

P 为降雨量 (mm); I 为灌溉量 (mm); ΔD_w 为研究时段内土壤水贮量变化值 (mm); C_p 为降雨中氯离子浓度 (mg/L); C_G 为地下水中氯离子浓度 (mg/L); C_S 为土壤水中氯离子浓度 (mg/L); C_R 为某一深度土层处下渗水分通量中氯离子的浓度 (mg/L)。

2 结果与分析

2.1 大埋深剖面土壤水分布与变化特征

根据土壤采样及机械组成的分析结果, 研究区土壤质地地在垂直方向上呈现较大的变异性。在地表至表层下 500 cm

深度的土壤中, 砂粒、粉粒和黏粒的比例大体分布适中, 土壤质地组成主要为壤土。仅在 160~ 200 cm 深度处夹有一厚度为 40 cm 的黏土层。在 500 cm 以下至 1 540 cm 深度的土壤层中, 土壤质地为砂土和黏土相间分布: 在深度为 560~ 640 cm、645~ 790 cm、810~ 860 cm、925~ 960 cm 和 1 250~ 1 430 cm 依次分布着厚度不等的砂土层, 黏土层的分布深度为 640~ 645 cm、790~ 810 cm、860~ 925 cm、960~ 1 250 cm 和 1 430~ 1 500 cm (图 1(a))。土壤质地决定了非饱和土壤的持水能力和导水特性^{[16][17]}。土壤剖面的水分分布及其变动在很大程度上依赖于土壤质地结构^[18]。

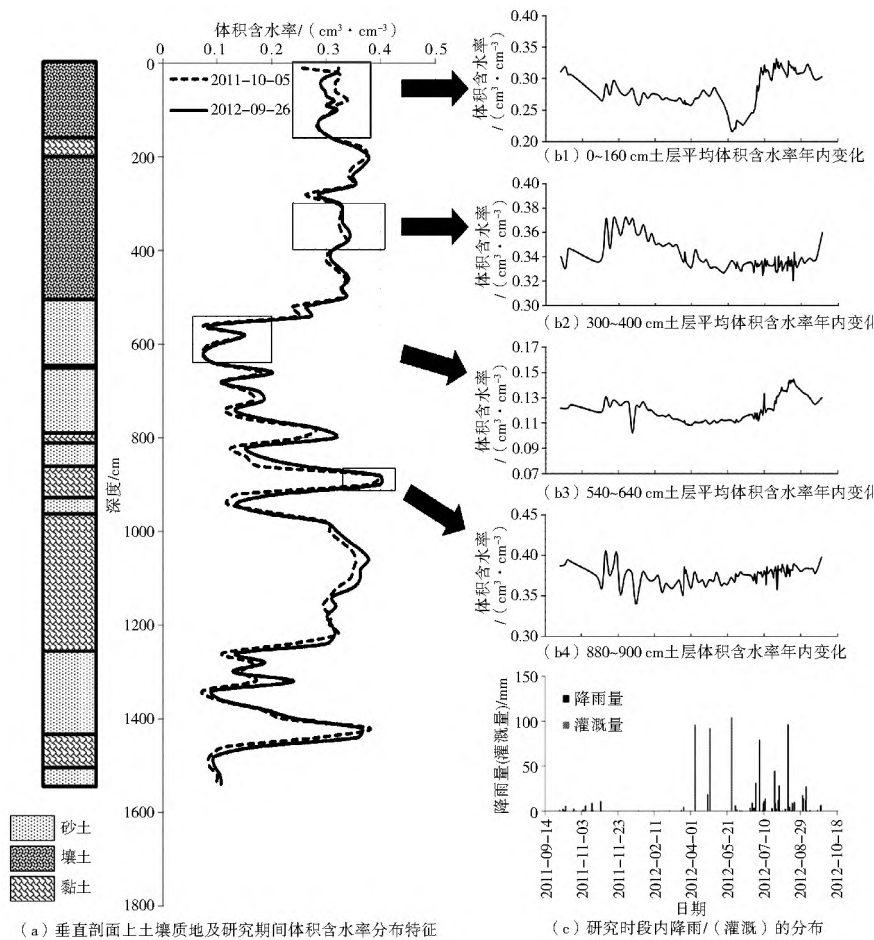


图 1 土壤剖面的质地和土壤水分布与变化特征

Fig. 1 Distribution and variation characteristics of soil texture and soil water content in the soil profile

土壤剖面的体积含水量分布及其变化见图 1, 土壤水分在垂直剖面上的分布受土壤质地影响存在着较大的差异性。在土壤表层至 500 cm 深度的土壤层中水分含量较高, 土壤水分体积含水率全年的平均值约为 0.31。其中 0~ 160 cm 的根区土壤水分变动受降水、灌溉和作物根系吸水的影响, 变动剧烈 (图 1(b1))。在 560 cm 深度处开始的砂层使土壤水分出现一个低值, 平均土壤水分为 0.1 左右, 年内的变幅仅 0.03 (图 1(b3))。该砂壤层断续延深至 760 cm 处, 其孔隙度约在 20%~ 30% 之间, 最上一个砂层的体积含水量周年都未能达到 15%, 很难形成毛管上升水, 因此, 可以认为土壤水分下渗至该层后将会缓慢渗漏, 最终补给地下水。在 760~ 1 000 cm 深的土层中, 土壤水分随深度起伏剧烈, 土壤水分含量最低处的砂土层全年平均体积含水率接近 0.1, 水

分最高处的黏土层体积含水率可高至 0.4, 接近饱和状态, 具有一定的季节性波动, 显示了该层水分的季节性补给和排泄。1 000~ 1 240 cm 深度土层处的土壤水分在垂直空间上的分布相对较为稳定, 全年内的平均体积含水率为 0.32, 同地表至 500 cm 深度土壤层的水分状况相似。1 200 cm 以下土层土壤水分在空间上的变异性呈现先逐渐增强后减弱的特征, 至 1 440 cm 处土壤水分接近饱和, 体积含水率 0.35。由于采样技术和观测手段的限制, 1 540 cm 以下的土壤水分未能观测。

2.2 降雨(灌溉)后土壤水分再分配特征

研究区地下水埋深大, 深厚的包气带区如同一个库容巨大的土壤水库, 对作物需水及降雨(灌溉)入渗补给地下水过程起到了一定的调节作用, 使地下水及深层土壤水分对降雨

(灌溉)的响应具有滞后性。沈振荣等^[9]在冉庄试验场模拟 8 m 埋深地下水对一次降雨入渗的响应试验,试验结果显示当降雨量为 193 mm 条件下,入渗对地下水的补给峰值滞后 60 天,整个降雨入渗对地下水的补给过程长达 360 天以上。在最早的入渗过程对土壤含水率分布影响的研究中^[20]发现干土在积水条件下的入渗具有明显的湿润锋,但在试验区地下水埋深达 40 m 的条件下,土壤水变化较为复杂。通常前一次降雨(灌溉)入渗过程还没有结束,后一个降雨(灌溉)入渗过程又已经开始。因此土壤水的动态表现为多次入渗过程的叠加影响。

图 2 为一次暴雨发生后的土壤剖面含水率变化曲线,降雨发生时间为 2012 年 7 月 4 日,降雨量 79.1 mm。曲线分别代表降雨发生前 2 日,降雨后 1 日、7 日和 20 日土壤体积含水率在土壤剖面上的变化。期间有 6 次小强度的降雨事件发生,累积降雨量 36.7 mm。从图 2 中可以看出,在降雨发生后的 24 h 内,160 cm 以上土壤的含水率显著增加,土壤水贮量由降雨发生前的 447 mm 增加至 498 mm,表明此次降雨过程中有近 50 mm 的降雨量储存在了地表至地表下 160 cm 深度的土壤层内。在深度为 160 ~ 300 cm 的土层内,降雨前后土壤水贮量增加了 14.2 mm。在 300 cm 之下的土壤层内,降雨 24 h 后,土壤水的含水率较降雨前没有变化。此次暴雨 1 周后的土壤含水率曲线在 200 cm 以上土层中的水分变化情况较为复杂,叠加了 7 月 8 日-10 日连续 3 天小强度降雨事件的影响。200~550 cm 土体水分含量增加明显,显示了土壤水分下渗补给的影响已达该深度,但很可能是累积了更早期降水的入渗影响。从暴雨发生 20 日后的水分剖面可以看出,560 cm 深度以下土层水分含量变化不大,其上的土壤层都受到了此次降雨过程的影响,该时段(2012 年 7 月 2 日-7 月 24 日)内的土壤水贮量在 0~560 cm

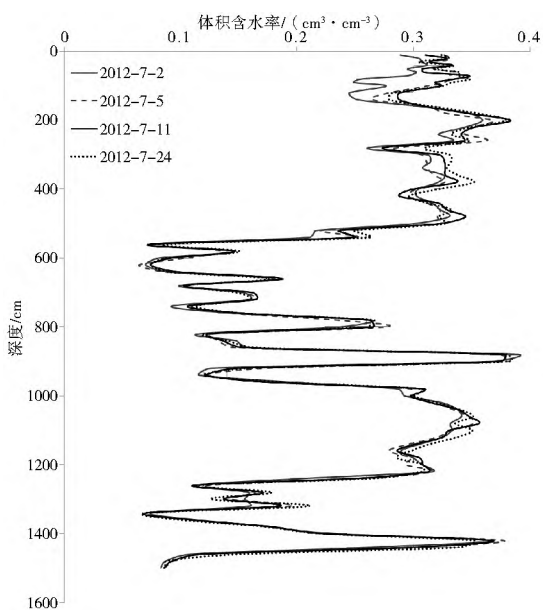


图 2 一次暴雨后土壤水分的再分配过程

(7 月 4 日降雨 79.1 mm, 8 日-10 日降雨 19.7 mm)

Fig. 2 Redistribution of soil water content after a rain storm event (precipitation of 79.1 mm on July 4th, and precipitation of 19.7 mm between July 8th and July 10th)

土层内增加了 130 mm。根据深层土壤机械组成分析,在 500 cm 处出现第一个砂土层,其中 500~560 cm 深度土层为壤土向砂土的过渡层。由于砂质土壤中有许多粗大的通气孔隙,这些孔隙的孔径较毛管孔径大,对水分不具有吸引力。因此可以认为水分在重力作用下经过砂土层下渗后很难再发生向上的运移。在 560~1540 cm 剖面上,水贮量增加了约 70 mm,为上部土层水分入渗的补给。

2.3 作物生育期土壤水贮量变化及渗漏量估算

分析不同作物在其各自的生育期内土壤水分变化情况(图 3(a))发现:在整个土壤垂直剖面上,冬小麦生长季始末各深度土壤水分变化大多为负值,且在 160 cm 以上的根层表现最为明显。随土壤深度增加,土壤水分的减小值呈减弱趋势,个别黏性较大的层次有微弱增加。而在玉米生育期内,玉米收获后的土壤水分较其播种时整个土层都有显著增加,显示土壤对雨季降水的储蓄。

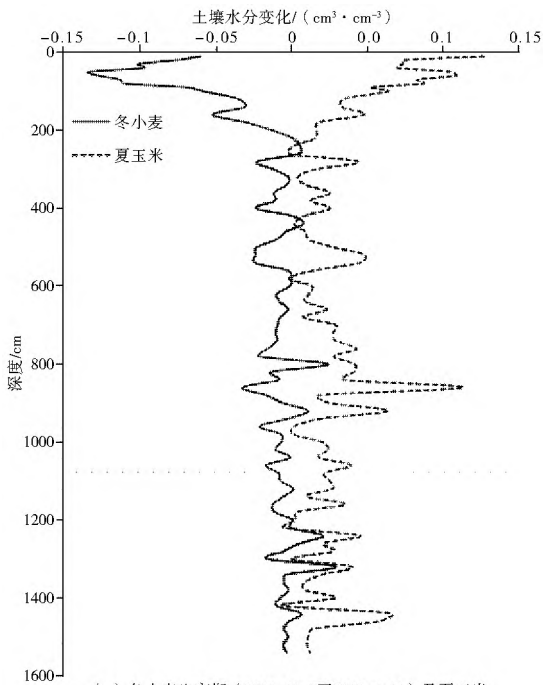
从全年的生长季来看(图 3(b)),土壤水分变化除了根区为负值外,其余深度几乎均为正值,这与实验年份夏季降水较为丰沛有关。

为了进一步了解作物生育期不同层次土壤水贮量的变化情况,根据公式(1)计算得出冬小麦、夏玉米生长季始末土壤水贮量及其变化量。从冬小麦播种至成熟收获这段时期,深度 0~160 cm 的根系层中土壤水贮量由播种时的 491 mm 减少至收获时的 372 mm,减少值约 119 mm。由于在冬小麦生育周期内,降雨量稀少,根据同期气象资料显示小麦越冬期间多年平均降雨量仅 10.2 mm。春季小麦返青后,对水分的需求量加大,稀少的降雨量不能够满足作物对水分的需求,冬小麦依靠吸收前期土壤累积的水分来维持生长。此外春季土壤蒸发作用较强,土壤水分消耗较大。这些原因导致了小麦生育期间根系分布层中土壤水分的亏损现象。此外,在 560 cm 处砂土层下部的土体中水贮量亏损值为 46.7 mm,可以认为这是在冬小麦生育期间深度为 560~1540 cm 的土层的水分向更深层土壤的补给过程。

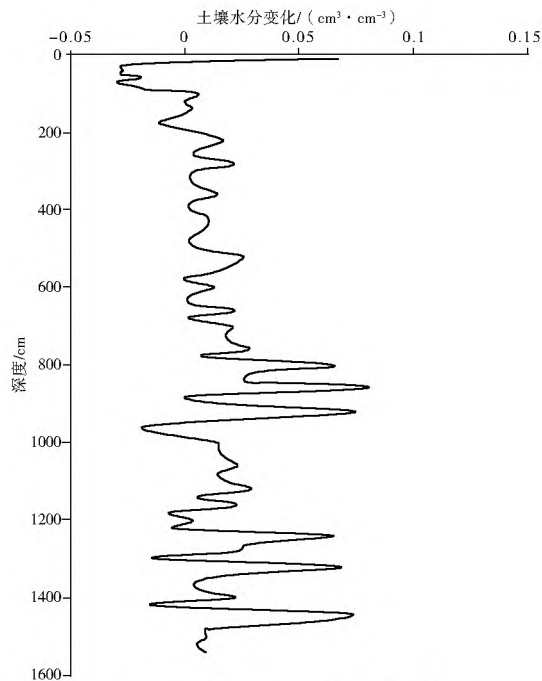
而在夏玉米播种至收获期间,土壤的水贮量表现为增加。其中在 160 cm 以上的根层土壤中水贮量增加了 113 mm,160~560 cm 的过渡层土壤水贮量约增加 75 mm,560 cm 以下至 1540 cm 土层的水贮量增加 237 mm。由于研究区在 6 月份进入雨季后,降水事件频发,并且试验期间恰遇降雨的丰水年,雨量充沛,虽然玉米生育期土壤蒸发和植物蒸腾作用强烈,土壤水分仍能得到雨水的补给而水贮量增加。

在为期一年的试验阶段,土壤水贮量在根层 0~160 cm 有微弱亏损,约为 -6 mm,而在 160~560 cm 土层中水贮量略增,为 32 mm,在 560 cm 以下土层的剖面表现为水分盈余,水贮量增加了 190 mm。这些水量有一部分可以视为会继续入渗补给地下水,但应该指出的是,这个量实际上一定程度上叠加了观测期间以前的入渗补给量,精确量仍需要多年连续观测数据的支持。

利用氯质量平衡法对通过第一个粗砂层界面(560 cm)的水分通量进行了估算,结果显示从冬小麦返青后(2012-3-26)至夏玉米收获前(2012-9-26)的半年时间内该界面处向下的水分通量约为 65 mm。同时段内有效降雨量为 408 mm,



(a) 冬小麦生育期(2011-10-5至2012-6-11)及夏玉米生育期(2012-6-8至2012-9-26)土壤水分变化



(b) 2011-10-5至2012-9-26全年土壤水分变化

图3 冬小麦-夏玉米生育期及全年土壤水分变化

Fig.3 Variations of soil water content in the soil profile during

(a) the wheat and maize seasons and
(b) the whole year

灌溉量约为 292 mm, 0~160 cm 根层内的土壤水贮量变化为 69 mm, 160~560 cm 土壤层的水贮量为 137 mm。由水量平衡可以算出经由根系层向下的水分通量为 202 mm, 该时段的蒸散量约为 429 mm。

3 结论

华北山前平原灌溉农田土壤水分的垂直分布受土壤质地组成的控制, 0~160 cm 根层的土壤水分对降水和灌溉响应敏感, 随时间的变化又受到作物根系吸水的影响较为复

杂, 变幅也最大。560 cm 深度处的粗砂层可以作为土壤水深层渗漏补给地下水的一个界面, 通过氯元素质量平衡法估算在 2012 年 3 月 26 日开始的半年内, 通过该界面下渗的土壤水可达 65 mm 之多。从土壤水储量的变化来看, 560~1540 cm 土层内全年的水储量增加近 190 mm, 应该是叠加了研究时段以前的土壤入渗影响。因此, 可以确认在山前平原灌溉农田存在较多的深层入渗和地下水补给量, 但精确定量仍需要多年观测数据和多种方法的估算来支持并确认。值得指出的是, 这个量的确定对于重新评估华北平原农田水量平衡, 进行更高效的水资源管理和地下水资源保护意义重大。

参考文献(References):

- [1] 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(05): 1004-1010. (SHEN Yair jun, LIU Chang-Ming. Agror ecosystems Water Cycles of the Typical Irrigated Farmland in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Ecrr Agriculture, 2011, 19(05): 1004-1010. (in Chinese))
- [2] Q. Fang, L. Ma, Q. Yu, et al. Irrigation Strategies to Improve the Water Use Efficiency of Wheat Maize Double Cropping Systems in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1165-1174.
- [3] 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展 [J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(01): 14-20. (KANG Shaor zhong. New Agricultural Scrtchnological Revolution and Development of Chinese Water saving Agriculture in 21st Century [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(01): 14-20. (in Chinese))
- [4] Jie Jiang, Yongqiang Zhang, Martin Wegehenkel, et al. Estimation of Soil Water Content and Evapotranspiration from Irrigated Cropland on the North China Plain [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(5): 751-761.
- [5] He Jin, Wang Zhongfu, Guo Shengxiu. Simulation of Water Dynamics of Farmland in the Piedmont Plain of the Taihang Mountains in the North China Plain [J]. Procedia Engineering, 2011, 12(0): 66-73.
- [6] Juana Paul Moiwu, Yonghui Yang, Shumin Han, et al. A Method for Estimating Soil Moisture Storage in Regions under Water Stress and Storage Depletion: A Case Study of Hai River Basin, North China [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(14): 2275-2287.
- [7] Xianfang Song, Shiqin Wang, Guoqiang Xiao, et al. A Study of Soil Water Movement Combining Soil Water Potential with Stable Isotopes at Two Sites of Shallow Groundwater Areas in the North China Plain [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(9): 1376-1388.
- [8] Yongqiang Zhang, Eloise Kendy, Qiang Yu, et al. Effect of Soil Water Deficit on Evapotranspiration, Crop Yield, and Water Use Efficiency in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2): 107-122.
- [9] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失 [J]. 土壤学报, 2006, 43(01): 17-25. (ZHANG Yu-ming, ZHANG Jia-bao, HU Chun-sheng, et al. Nitrate Leaching in Wheat maize Rotation Field in the North

- China Plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(01): 17-25. (in Chinese)
- [10] Changming Liu, Xiying Zhang, Yongqiang Zhang. Determination of Daily Evaporation and Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize by Large scale Weighing Lysimeter and Micro lysimeter [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109-120.
- [11] 孙宏勇, 刘昌明, 王振华, 等. 太行山前平原近 40 年降水的变化趋势及其对作物生产的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(06): 18-21. (SUN Hongyong, LIU Changming, WANG Zhenhua, et al. Changing Trend of Precipitation and Its effects on Crop Productivity in the Piedmont of Taihang Mountain [J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2007, 15(06): 18-21. (in Chinese)
- [12] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. (HUANG Changyong. Soil Science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 张利, 张彩英, 彭春香. 沧州地区土壤水资源研究 [J]. 自然资源学报, 1990, 5(03): 230-236. (ZHANG Li, ZHANG Caiying, PENG Chunxiang. A Study on the Soil Water in Cangzhou Prefecture [J]. Journal of Natural Resources, 1990, 5(03): 230-236. (in Chinese)
- [14] 顾慰祖. 同位素水文学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. (GU Weizhu. Isotope Hydrology [M]. Beijing: Sciences Press, 2011. (in Chinese)
- [15] GB Allison, MW Hughes. The Use of Environmental Chloride and Tritium to Estimate Total Recharge to an Unconfined Aquifer [J]. Soil Research, 1978, 16(2): 181-195.
- [16] 王文焰, 张建丰. 黄土的粒度组成与水分运动参数的相关性 [J]. 水利学报, 1991, 1(1): 13-17. (WANG Weryan, ZHANG Jianfeng. Correlation between the Consist of Loess Granularity and the Parameter of Moisture Movement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 1(1): 13-17. (in Chinese)
- [17] 来剑斌, 王永平, 蒋庆华, 等. 土壤质地对潜水蒸发的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31(06): 153-157. (LAI Jianbin, WANG Yongping, JIANG Qinghua, et al. Study on Phreatic Evaporation under Different Soil Textures [J]. Journal of Northwest SciTech University of Agricultural and Forest (Natural Science Edition), 2003, 31(06): 153-157. (in Chinese)
- [18] 杨泉, 罗浩. 不同土壤质地的土壤含水率的空间变异性 [J]. 吉林水利, 2010, (11): 30-32. (YANG Quan, LUO Hao. Spatial Variability of Soil Water Contents in Different Soil Texture [J]. Jilin Water Resources, 2010, (11): 30-32. (in Chinese)
- [19] 沈振荣, 张瑜芳, 杨诗秀, 等. 水资源科学实验与研究: 大气水, 地表水, 土壤水, 地下水相互转化关系 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. (SHEN Zhenrong, ZHANG Yufang, YANG Shixiu, et al. Water Resources Scientific Experiment and Research atmospheric, Surface, Soil and Groundwater Interactions [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [20] EA Colman, GB Bodman. Moisture and Energy Conditions during Downward Entry of Water into Moist and Layered soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1945, 9(C): 3-11.

(上接第 135 页)

- [5] Lautenbach S, Jrgen B, Graf N, et al., Scenario Analysis and Management Options for Sustainable River Basin Management: Application of the Elbe DSS [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(1): 26-43.
- [6] 钟平安, 陈金水, 陈惠惠, 等. 实时水库优化调度决策支持系统及其应用 [J]. 水利水电技术, 1994, (12): 2-7. (ZHONG Pingan, CHEN Jinshui, CHEN Weihui, et al. Decision Support System for Optimal Reservoir Realtime Operation and Its Application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1994, (12): 2-7. (in Chinese)
- [7] 何炎祥, 陈莘明. Agent 和 Agent 系统的设计与应用 [M]. 武汉大学出版社, 2001: 1-8. (HE Yanxiang, CHEN Shexing. Design and Application of Agent and Agent Systems [M]. Wuhan University Press, 2001: 1-8. (in Chinese)
- [8] 黎静华, 韦化, 夏小琴. 智能电网下节能发电调度多 Agent 系统的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, (21): 96-103. (LI Jinghua, WEI Hua, XIA Xiaojin. Multi Agent Model and Method for Units Commitment in Energy-saving Generation Dispatching [J]. Power System Protection and Control, 2010, (21): 96-103. (in Chinese)
- [9] Logenthiran T, Srinivasan D, Khambadkone A M. Multi Agent System for Energy Resource Scheduling of Integrated Microgrids in a Distributed System [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 138-148.
- [10] Chen Y M, Wang B. A Study on Modeling of Human Spatial Behavior Using Multiagent Technique [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3048-3060.
- [11] 马贞立, 李臣明, 徐立中. 跨流域调水管理多 Agent 仿真环境模型 [J]. 水利学报, 2007, (S1): 288-292. (MA Zhenli, LI Chenming, XU Lizhong. Multiagent Simulation Environment Model in Water Diversion across River Basins Management [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (S1): 288-292. (in Chinese)
- [12] 赵建军, 李书琴. 基于多 Agent 的洪水预报系统研究 [J]. 微机计算机信息, 2008, (9): 8-9. (ZHAO Jianjun, LI Shuqin. Research on the Flood Forecast System based on Multi Agent [J]. Microcomputer Information, 2008, (9): 8-9. (in Chinese)
- [13] Pieter R. van Oel, Maarten S. Krol, Arjen Y. Hoekstra. Application of Multi Agent Simulation to Evaluate the Influence of Reservoir Operation Strategies on the Distribution of Water Availability in the Semi-Arid Jaguaribe Basin, Brazil [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 07: 051.
- [14] Farolfi S, Mller J, Bont B. An Iterative Construction of Multi Agent Models to Represent Water Supply and Demand Dynamics at the Catchment Level [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(10): 1130-1148.