

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.012.

杨永辉, 郭佳宾, 武继承, 等. 不同灌溉方式下氢、氧同位素分布与小麦水分利用特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 260-267.

YANG Yonghui, WU Jiabin, WU Jicheng, et al. Hydrogen and Oxygen Isotope Distribution and Water Use Characteristics of Wheat Under Different Irrigation Methods[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 260-267.

## 不同灌溉方式下氢、氧同位素分布与小麦水分利用特征

杨永辉<sup>1,2,3</sup>, 郭佳宾<sup>4</sup>, 武继承<sup>1,2,3</sup>, 杨先明<sup>5</sup>, 高翠民<sup>1,2,3</sup>, 潘晓莹<sup>1,2,3</sup>, 何方<sup>1,2,3</sup>

(1.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2.农业部作物高效用水原阳科学观测试验站, 河南 原阳 453514; 3.河南省黄河流域节水农业野外科学观测研究站, 河南 原阳 453514; 4.水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 5.河南邦友科技有限公司, 郑州 450001)

**摘要:** [目的] 探明不同灌溉方式对小麦水分利用的贡献率及小麦根系吸水规律, 可为合理应用灌溉用水提供科学依据。[方法] 利用稳定氢氧同位素示踪法, 研究了防雨棚条件下常规灌溉(X)与滴灌(D)不同灌水量条件下(X<sub>1</sub>, D<sub>1</sub>: 15 mm; X<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>: 30 mm; X<sub>3</sub>, D<sub>3</sub>: 45 mm)冬小麦生长期土壤水稳定同位素变化特征, 以及土壤耗水强度、光合生理特征及水分利用特征。[结果] 随小麦生育期的推进, 根系吸水逐渐加深。在拔节期小麦主要利用0—20 cm深度的土壤水; 在抽穗期X<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>处理主要利用了0—20 cm土层的水分, 但X<sub>1</sub>处理主要利用了60—80 cm土层的水分, 占53.9%, X<sub>3</sub>处理主要利用了40—60 cm土层的水分, 占77.0%。而D<sub>3</sub>处理主要利用了0—60 cm土层的水分, 占80.0%; 到灌浆期, X<sub>1</sub>和X<sub>2</sub>处理主要利用了0—60 cm土层的水分, 分别占86.2%和90.6%, 而X<sub>3</sub>处理主要利用了40—60 cm土层的水分, 占73.9%。而D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>处理不同土层的水分利用比例较均匀, 分别介于7.1%~27.8%和13.0%~38.2%之间。D<sub>3</sub>处理主要利用了20—40 cm土层的水分, 占51.0%。除抽穗—灌浆期中水处理(D<sub>2</sub>)及灌浆—收获期高水处理(D<sub>3</sub>)外, 滴灌均有效降低了小麦的日耗水量。与常规灌溉相比, 滴灌D<sub>2</sub>和D<sub>3</sub>处理更利于提高小麦的光合速率和叶片水分利用效率。此外, 滴灌处理在小麦抽穗期和收获期均有效提高了小麦的生物量。最终, 滴灌较常规耕作小麦产量提高了21.6%~28.0%和水分利用效率提高了24.4%~36.7%, 均以D<sub>2</sub>处理最高。相关分析表明: 小麦生长过程中, 抽穗期0—20 cm土层水分贡献率和灌浆期80—100 cm土层的水分贡献率的提高对于其产量与水分利用效率的提高更为有利。[结论] 滴灌更利于提供均匀的水分供给作物, 同时减少水分无效蒸发, 提高作物产量和水分利用率。

**关键词:** 滴灌; 稳定氢氧同位素; 水分运移; 冬小麦; 水分利用

中图分类号: S275.3; S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0260-08

## Hydrogen and Oxygen Isotope Distribution and Water Use Characteristics of Wheat Under Different Irrigation Methods

YANG Yonghui<sup>1,2,3</sup>, WU Jiabin<sup>4</sup>, WU Jicheng<sup>1,2,3</sup>, YANG Xianming<sup>5</sup>,

GAO Cuimin<sup>1,2,3</sup>, PAN Xiaoying<sup>1,2,3</sup>, HE Fang<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China; 3. Field Scientific Observation and Research Station of Water-Saving Agriculture in the Yellow River Basin of Henan Province, Yuanyang 453514, China; 4. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China; 5. Henan Bangyou Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** [Objective] Ascertaining the contribution rate of different irrigation methods to wheat water use and the water absorption law of wheat root system can provide a scientific basis for the rational application of

收稿日期: 2022-05-05

修回日期: 2022-05-13

资助项目: 河南省重大科技专项(221100110700); 河南省农业科学院自主创新资金项目(2023ZC038); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0003)

第一作者: 杨永辉(1978—), 男, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 研究方向为水肥资源利用与管理。E-mail: yangyongh2020@126.com

通信作者: 杨先明(1979—), 男, 河南固始县人, 硕士研究生, 高级农艺师, 主要从事植物营养与新型肥料、土肥检测、农业信息化技术与装备等方面的研究工作。E-mail: 277921230@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

irrigation water. [Methods] Based on hydrogen-oxygen stable isotope tracing method, the characteristics of soil water stable isotope change during winter wheat growth under conventional irrigation (X) and drip irrigation (D) ( $X_1$ ,  $D_1$ : 15 mm;  $X_2$ ,  $D_2$ : 30 mm;  $X_3$  and  $D_3$ : 45 mm) were studied. [Results] The absorption of water deepened with the advancement of the wheat growth period. Soil moisture in 0—20 cm depth was mainly consumed by wheat in the jointing stage under different treatments. In the heading stage,  $X_2$ ,  $D_1$ , and  $D_2$  treatments mainly used soil moisture in 0—20 cm layer, but  $X_1$  treatment mainly used soil moisture in 60—80 cm layer, accounting for 53.9%, and  $X_3$  treatment mainly used soil moisture in 40—60 cm, accounting for 77.0%.  $D_3$  treatment mainly used soil moisture in 0—60 cm layer accounting for 80.0%. In the filling stage,  $X_1$  and  $X_2$  treatments mainly used soil moisture in 0—60 cm, accounting for 86.2%, and 90.6%, respectively, while  $X_3$  treatment mainly used soil moisture in 40—60 cm layer, accounting for 73.9%. However, the water use ratio of different soil layers of  $D_1$  and  $D_2$  treatments were more uniform, ranging between 7.1%~27.8% and 13.0%~38.2%, respectively. The  $D_3$  treatment mainly utilized the water in the 20—40 cm soil layer, accounting for 51.0%. Drip irrigation, except for  $D_2$  and  $D_3$  treatments, could effectively reduce the daily water consumption of wheat. Compared with conventional irrigation,  $D_2$  and  $D_3$  treatments were more beneficial to improve the photosynthetic rate and leaf water use efficiency of wheat. Moreover, drip irrigation treatment effectively improved the wheat biomass during both the heading and harvest periods. Finally, wheat yield and water use efficiency under the drip irrigation condition increased by 21.6%~28.0% and 24.4%~36.7%, respectively, compared with conventional irrigation conditions, and the  $D_2$  treatment resulted in the highest among different treatments. The related analysis showed that during the growth process of wheat, the increment of water contribution rate of 0—20 cm layer in the heading growth stage and 80~100 cm layer in the filling growth stage was more conducive to improving the yield and water use efficiency. [Conclusion] Drip irrigation is more conducive to providing uniform water supply to crops, and reducing ineffective evaporation of water and improving crop yield and water utilization.

**Keywords:** drip irrigation; stable hydrogen and oxygen isotopes; moisture movement; winter wheat; water use

作物水分利用一直是农业研究的热门话题,对于水分利用量的确定大都利用常规方法、经验公式或模型等进行计算分析。但对于水分进入土壤后在土壤中的如何分配及对作物生长的贡献比例仍不十分清楚。20世纪80年代,稳定同位素被逐渐引入到土壤水的研究当中,稳定氢、氧同位素可作为天然的示踪剂来追踪水在土壤中的运移信息<sup>[1]</sup>和分布特征<sup>[2]</sup>。利用稳定氢、氧同位素技术可确定作物不同生育期主要吸收利用土壤水分的深度<sup>[3]</sup>。邬佳宾等<sup>[4]</sup>研究苜蓿时发现,滴灌紫花苜蓿以30 cm上下土层土壤水作为主要水分来源。Zhao等<sup>[5]</sup>研究发现,冬小麦在不同土层的根系吸水深度以0—20 cm为主,而夏玉米在拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期的根系吸水深度依次为0—20 cm, 20—40 cm, 40—120 cm和0—20 cm。而Zhang等<sup>[6]</sup>研究发现,小麦整个生育期的水分主要来源于0~40 cm土层。吴有杰<sup>[7]</sup>通过分根交替灌溉研究发现,在玉米在前、中、后期的根系吸水深度分别为20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm。Guo等<sup>[8]</sup>研究发现,冬小麦在越冬期和返青期主要利用了10—20 cm的土壤水;在拔节期主要利用了0—20 cm,

0—40 cm和80—180 cm的土壤水;在抽穗期主要利用了60—80 cm和180—220 cm的土壤水;在灌浆期和成熟期分别以0—40 cm和80—100 cm的土壤水为主。但在小麦全生育期不接纳降水,而全程进行控水的条件下,不同灌溉方式水分在土壤以及在作物体内的分布特征及不同土层水分贡献比例对小麦产量及水分利用的影响如何,需要深入研究,以确定单一水源条件下小麦水分利用特征,摸清不同灌溉方式对小麦水分的贡献率及小麦根系吸水规律,从而为合理的应用灌溉用水提供科学依据。为此,利用氢氧同位分示踪技术,研究防雨棚条件下小麦根层水分稳定氢氧同位素分布特征,提取不同灌溉方式条件下水在土壤中的运移信息,及作物根层剖面水分的利用比例及规律,从而进一步阐明不同灌溉方式的节水机理,促进农业水资源的高效利用和持续稳定发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

农业部原阳科学观测试验站地处黄河北岸新乡市原阳县南部的河南省农业科学院现代农业科技试验示

范基地内,位于107国道与郑焦高速公路的夹角地带,平均海拔85m,年均气温14.3℃,年均降水量556mm,全年无霜期227d。试验地土壤为壤质潮土,肥力均匀,地势平坦,耕层有机质12.6g/kg、全氮1.08g/kg、速效氮80.1mg/kg、速效磷18.2mg/kg、速效钾120.9mg/kg。该区种植方式为小麦、玉米轮作。

## 1.2 研究方案

本试验在防雨棚中进行,设置灌水量为15mm/次、30mm/次、45mm/次,设置灌水方式为:小白龙(常规)和滴灌,即处理分别位为: $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  和  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ 。小麦氮肥(N)用量210kg/hm<sup>2</sup>,磷肥(P<sub>2</sub>O)为135kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)为150kg/hm<sup>2</sup>。氮肥50%与全部磷钾肥底施。小区面积为3m×4m=12m<sup>2</sup>,每个处理3个重复,共18个小区。小麦品种为郑麦1860,播种量为150kg/hm<sup>2</sup>。根据土壤水分及作物生长情况,分别在小麦播种前、越冬期和返青期进行灌水40mm以确保防雨棚中小麦正常生长。在小麦拔节期、抽穗期和灌浆期分别按照设置的灌水量进行灌水。小麦全生育期累计进行6次灌水。

## 1.3 样品采集与分析方法

在小麦拔节期、抽穗期和灌浆期灌水3~4d后采用土钻分层(0—20cm, 20—40cm, 40—60cm, 60—80cm, 80—100cm)采集0—100cm土壤样品。土壤样品分为两份,一份装入铝盒利用烘干法(105℃, 12h)测定土壤含水量;另一份密封于10ml的螺纹玻璃样品瓶中冷藏保存。为了避免植物蒸腾引起的同位素分流,在晴天11:00—13:00点采样(与土壤样品采样时间一致),剪取地下10cm深度的小麦根系,避免含有叶绿素的部分,混匀后迅速放入10ml的螺纹玻璃样品瓶中冷藏保存。样品采集完毕后,实验室内利用低温真空抽提系统抽提土壤水样和植株水样密封并于4℃下保存。采用液态水同位素分析仪测定样品水样中的稳定氢氧同位素丰度。采用IsoSource软件<sup>[9]</sup>进行不同土层土壤和植物根系中的同位素数据分析,获得不同土层土壤水分的贡献率。

## 1.4 测定项目与方法

1.4.1 净光合速率测定 光合参数采用美国Li-Cor公司生产的Li-6400光合仪测定。在小麦灌浆期灌水后第4天(2021年5月15日)晴朗无风时于9:30—11:00进行光合参数的测定。测定叶片部位为小麦旗叶。

1.4.2 土壤水分测定与水分利用效率、灌水利用率计算 在小麦播拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期,采用土钻获取0—100cm土层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100cm)土壤,放入烘箱中105℃烘24h,测定含水量,进而得知不同土层和0—100cm土层土壤储水

量,并计算不同生育期耗水量和水分利用效率。

土壤储水量(mm)=土壤含水量(%)×容重(g/cm<sup>3</sup>)×土层厚度(cm)×10

全生育期耗水量(mm)=播种前土壤储水量(mm)+生育期内灌水量(mm)-收获时土壤储水量(mm)

水分利用效率[kg/(mm·hm<sup>2</sup>)] = 籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>)/全生育期耗水量(mm)

## 1.5 数据处理

光合参数为9次重复(在每处理3个重复内分别测定3次样品)的平均值,其他结果为3次重复的平均值,且所得的数据应用SPSS 19.0进行处理。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同灌溉方式作物不同生育期氢氧同位素土壤剖面分布特征

水分在植物体内运移时,一般不存在稳定氢氧同位素的分馏,植物导管内水分同位素保持与来源水分相同的同位素组成<sup>[10]</sup>。因此,当小麦根系中水分稳定氢氧同位素组成与土壤的某一层中水稳定氢氧同位素组成相同时,可认为小麦根系吸收的水分主要来自于此层土壤。

从图1—3中可知,在两种灌溉方式下,土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度均高于 $\delta\text{D}$ 同位素丰度。在常规灌溉条件下,在拔节期,随土层的加深, $\delta\text{D}$ 同位素丰度表现为逐渐降低而后增加的趋势。随灌水量的增加, $\delta\text{D}$ 同位素丰度变化不明显,均介于-50‰左右,而 $\delta^{18}\text{O}$ 含量则表现为逐渐降低的趋势,二者的剖面分布曲线与根系中 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度的交点逐渐加深至10cm左右,说明根系主要吸水层为0—10cm。对于滴灌而言,在拔节期,随灌水量的增加,其氢氧同位素均表现先降后增的趋势。其 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度与根系中的 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度变化曲线相交于15cm处,说明拔节期,滴灌条件下根系主要吸水土层深度为15cm。

从图2中可知,到抽穗期,在常规灌溉条件下,随土层的加深 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素在中高灌量条件下表现为先降低后增加而降低的趋势,而在中等灌水量条件下,0—50cm土层的 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度明显增加,随土层的加深逐渐提高,至70cm以下土层,其含量基本保持稳定。整体来看,其根系吸水层仍主要位于15cm深度处。在滴灌灌溉条件下,随土层的加深 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素在不同灌水量条件下均表现为逐渐降低的趋势,其 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素丰度曲线与根系中的丰度曲线交汇于20cm左右,说明在抽穗期,滴灌条件下,根系的主要吸收层深度为20cm,灌水量对其分布影响不明显。

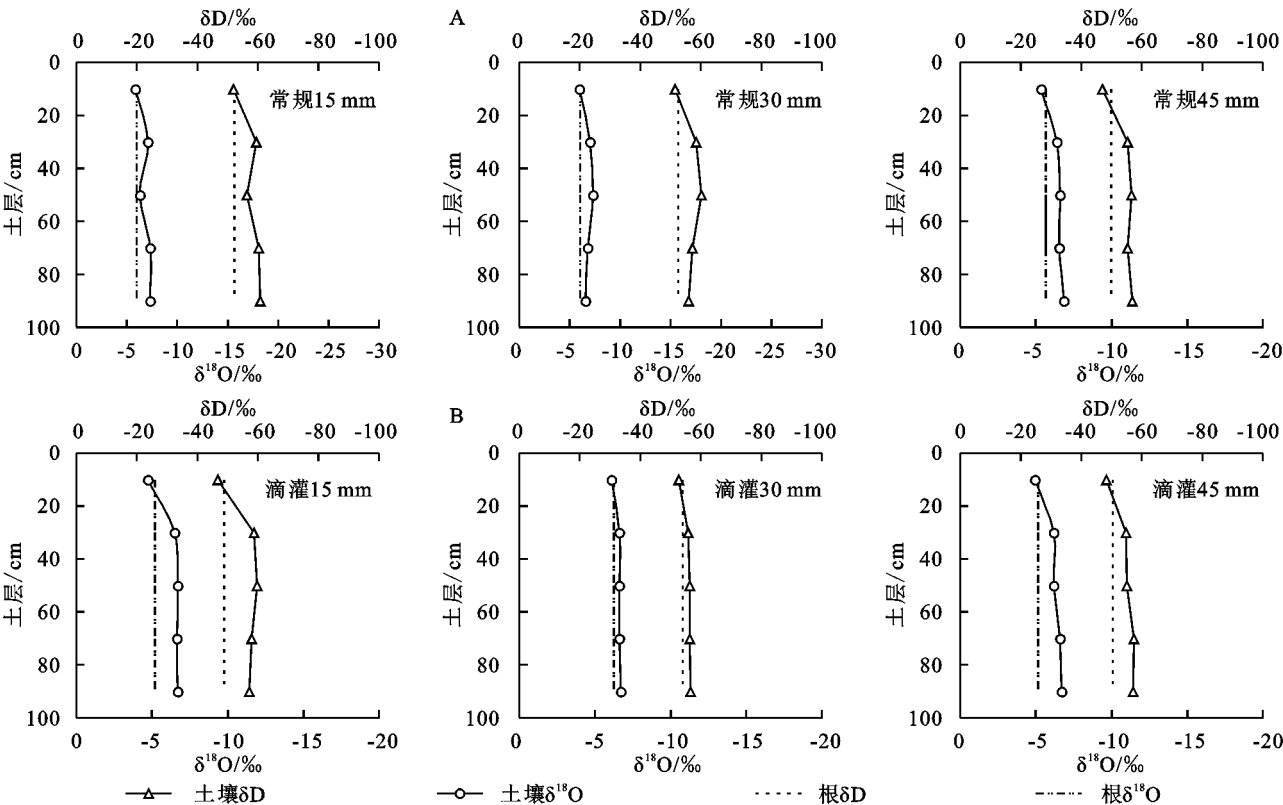


图 1 拔节期常规灌溉和滴灌灌水后氢氧同位素分布特征

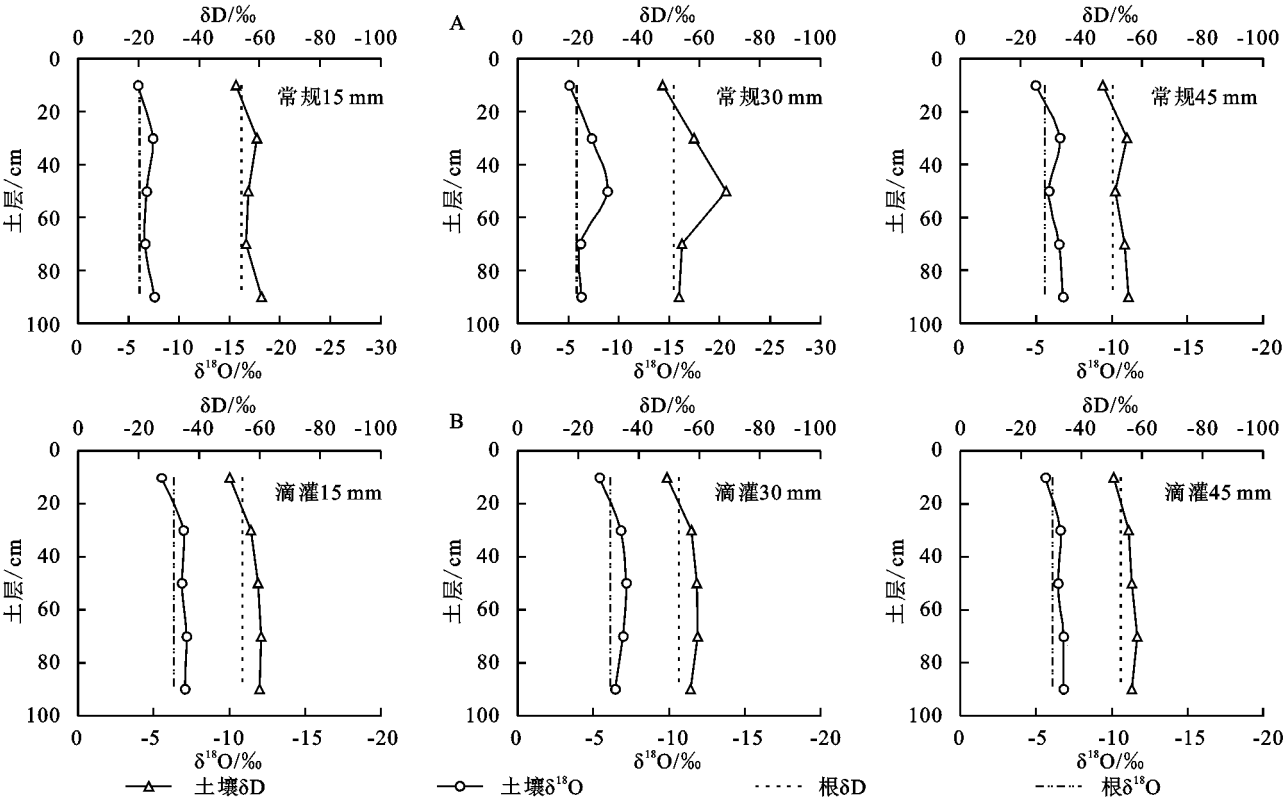


图 2 抽穗期常规灌溉和滴灌灌水后氢氧同位素分布特征

从图 3 中可知,到灌浆期,在常规灌溉条件下,随灌水量的增加,其  $\delta^{18}\text{O}$  同位素丰度呈升高趋势, $\delta\text{D}$  同位素丰度变化不明显。在低灌水量条件下,土壤中  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素丰度曲线与根系中的含量曲线交于 20 cm;在中等灌水量条件下,二者  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素曲线交于 25 cm 和 60 cm 处理;在高灌水量条件下,二者  $\delta^{18}\text{O}$  同位素曲线相交于 30 cm、55 cm 和 75 cm,而二者  $\delta\text{D}$  同位素曲线交于 50 cm。综上,在常规条件下,根系吸水有



逐渐向土层深处增加的趋势。到灌浆期,在滴灌灌溉条件下,随灌水量的增加,其  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素丰度变化并不一致。在低灌水量条件下,土壤中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素丰度曲线与根系中的含量曲线交于 30 cm 和 90 cm 土层;在中等灌水量条件下,二者  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  同位素曲线

交于 10 cm、40 cm 和 60 cm 处理;在高灌水量条件下,二者  $\delta^{18}O$  同位素曲线交于 30 cm 和 45 cm,而二者  $\delta D$  同位素曲线交于 25 cm。综上,在滴灌条件下,中等灌水条件下,根系在土体中获取水分和根系分布更为合理。

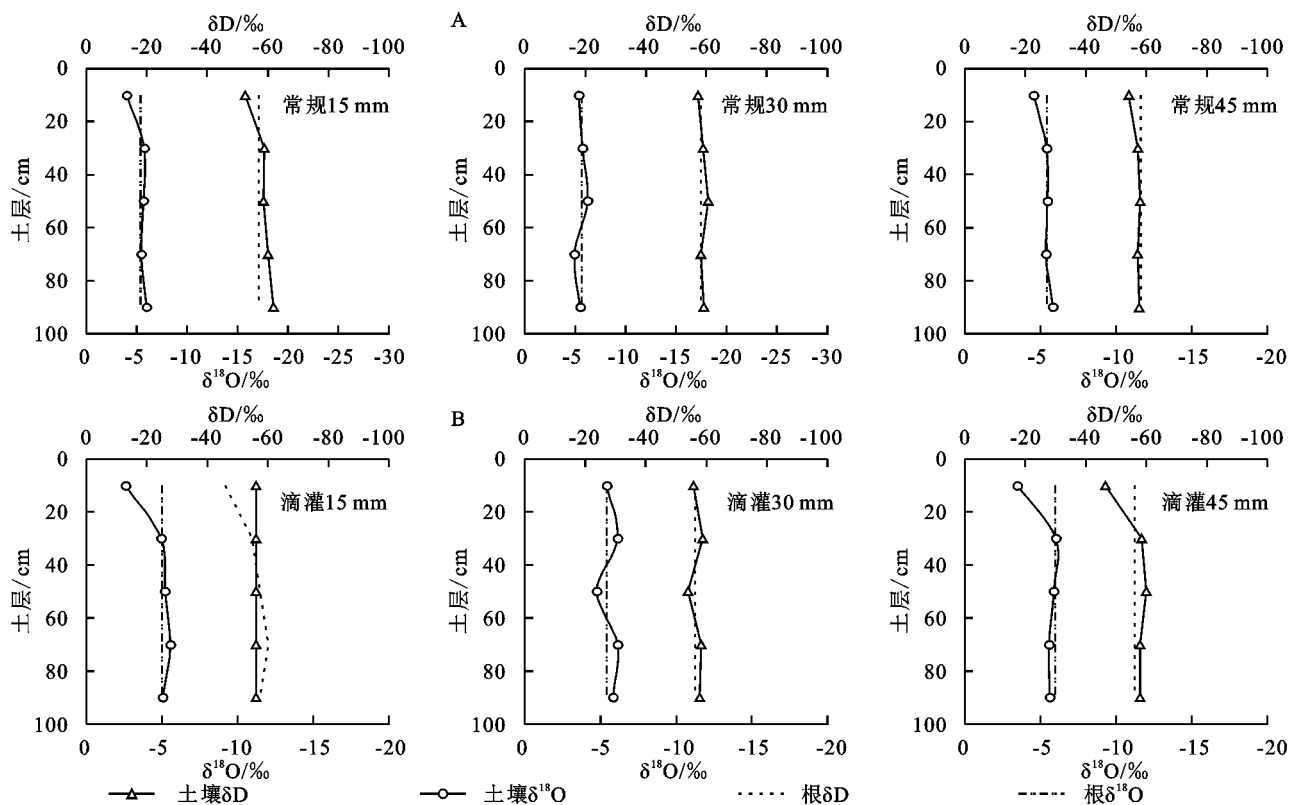
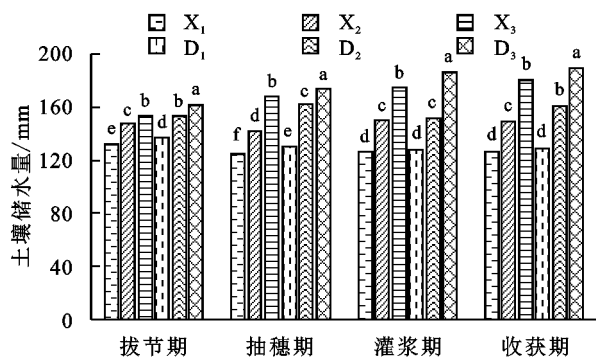


图3 灌浆期常规灌溉(A)和滴灌(B)灌水后氢氧同位素分布特征

## 2.2 不同灌溉方式作物不同生育期土壤储水特征

从图4中可知,随小麦生育期的推进,土壤储水量表现为逐渐增加的趋势。在拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期,土壤储水量均随灌水量的增加而增加。两种灌溉方式高灌水量处理( $X_3$ 和 $D_3$ )的储水量均随生育期的推进而增加。整体来看,滴灌各处理的储水量均高于常规灌溉。



注:相同生育期不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图4 小麦不同生育期土壤储水量变化特征

## 2.3 不同灌溉方式小麦不同生育期不同土层耗水特征

从表1中可知,随小麦生育期的推进,不同土层对

其水分的贡献比例存在明显差异。在拔节期,表层水分供应占明显优势,均到达了70.5%~87.5%,其他土层水分贡献比例低于10%。而到抽穗期,随着作物根系的深入,其深层水分的供应有所增加。在滴灌高灌水量条件下( $D_3$ ),其0—60 cm土层的水分贡献比例明显高于60—100 cm土层,而中低灌水条件下,仍以表层水分供应为主。在常规灌溉条件下, $X_1$ 处理60—80 cm土层的水分贡献率最大,达53.9%。而 $X_2$ 和 $X_3$ 处理小麦的最大耗水贡献土层为0—20 cm和40—60 cm。到灌浆期,不同灌水模式条件下不同土层的贡献比例明显不同。在常规灌溉条件下, $X_1$ 和 $X_2$ 处理0—60 cm土层的水分贡献最高,超过了85%以上,而 $X_3$ 处理以40—60 cm土层的水分贡献率最大,达73.9%。对于滴灌 $D_1$ 和 $D_2$ 处理而言,不同土层的水分贡献较为均匀, $D_1$ 处理不同土层的水分贡献率保持在7.1%~27.8%之间, $D_2$ 处理保持在13.0%~38.2%。而 $D_3$ 处理以20—40 cm土层水分贡献率最大,占51.0%。其他土层的水分贡献率介于7.1%~15.6%之间。

## 2.4 不同灌溉方式作物不同生育期耗水特征

从表2中可知,在小麦生育期内,拔节—抽穗和

灌浆—收获期的耗水量强度最大,不同灌溉方式及灌水量对其影响差异明显。随灌水量的增加,其日耗水量呈增加趋势,且除抽穗—灌浆期中水处理(D<sub>2</sub>)及灌浆—收获期高水处理(D<sub>3</sub>)外,滴灌均有效降低了小麦的日耗水量。说明,滴灌更利于降低作物耗水量,提供作物有效的水分以供其正常生长。

表 1 小麦不同育期不同土层耗水量贡献比例 %

生育期	土层/cm	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
拔节期	0—20	87.3a	84.3a	70.5a	76.4a	67.9a	77.5a
	20—40	3.0c	3.2de	9.3b	5.4cd	8.0c	6.3b
	40—60	4.7b	2.4e	7.5c	4.7d	10.2b	6.4b
	60—80	2.7c	4.1cd	7.3c	6.3bc	7.9c	5.5bc
	80—100	2.3c	5.9b	5.5d	7.2b	6.0d	4.2c
抽穗期	0—20	14.1c	66.5a	12.5b	86.0a	81.6a	25.8b
	20—40	5.1e	2.9c	3.5cd	4.1b	4.3c	28.3a
	40—60	18.6b	1.2c	77.0a	4.3b	2.6c	25.9b
	60—80	53.9a	13.9b	4.0c	2.6c	3.0c	8.2d
	80—100	8.3d	15.5b	2.9d	3.0bc	8.5b	11.8c
灌浆期	0—20	22.0b	49.6a	2.0c	7.1d	18.6b	7.1d
	20—40	32.1a	22.9b	8.0b	27.8a	13.0c	51.0a
	40—60	32.1a	18.1c	73.9a	25.2a	38.2a	12.1c
	60—80	6.6c	3.0e	8.5b	17.8c	12.8c	14.1bc
	80—100	7.1c	6.3d	7.7b	22.1b	17.4b	15.6b

注:相同生育期同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.5 不同灌溉方式作物灌浆期光合生理特征

从表 3 中可知,随灌水量的增加,常规灌溉与滴灌

表 3 不同灌溉方式不同灌水量对小麦灌浆期光合生理特征的影响

处理	光合速率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	叶片水分利用效率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )
X <sub>1</sub>	5.77c	1.21d	2.31d	2.50c
X <sub>2</sub>	6.21b	1.17d	2.40c	2.59b
X <sub>3</sub>	5.71c	1.16d	2.23d	2.56bc
D <sub>1</sub>	6.12b	1.34b	2.46c	2.49c
D <sub>2</sub>	7.61a	1.28c	2.77a	2.74a
D <sub>3</sub>	7.27a	1.43a	2.67b	2.72a

注:同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ ),下同。

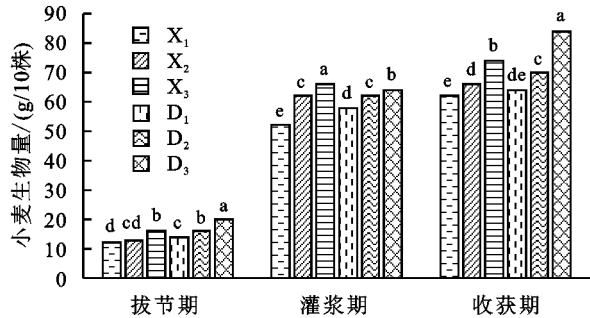


图 5 小麦不同生育阶段生物量

2.7 不同灌溉方式对小麦成产要素及水分利用的影响

从表 4 中可知,无论灌水方式如何,随灌水量的增加,小麦株高、穗长、小穗数、千粒重、耗水量、产量及水分

条件下小麦光合速率和蒸腾速率均表现为先增加再降低趋势。而气孔导度以滴灌条件下高水处理(D<sub>3</sub>)最高,其次为低水处理(D<sub>1</sub>),且滴灌条件下的小麦叶片气孔导度和蒸腾速率均高于常规灌溉,但滴灌对光合速率提高的幅度更大,从而提高了叶片水分利用效率。最终,小麦叶片水分利用效率随灌水量的增加表现为先增加后降低的趋势,两种灌溉方式均以中水处理(X<sub>2</sub>,D<sub>2</sub>)最佳,且滴灌处理(D<sub>2</sub>)优于常规灌溉。

表 2 不同灌溉方式不同灌水量对小麦日耗水量的影响

时期	耗水量/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )					
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
播种—拔节	0.59b	0.59b	0.65a	0.56b	0.55b	0.59b
拔节—抽穗	1.17c	1.88a	1.58b	1.13c	1.12c	1.52b
抽穗—灌浆	0.43d	0.74c	1.28a	0.37e	1.35a	1.09b
灌浆—收获	0.87e	1.71c	2.18b	0.78f	1.18d	2.33a

注:同行不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.6 不同灌溉方式对小麦不同生育期生物量的影响

从图 5 中可知,随生育期的推进,小麦地上生物量均呈明显增加趋势。随灌水量的增加,小麦的生物量均呈增加趋势。在抽穗期,滴灌不同灌水量处理的生物量均高于对应灌水量的常规灌溉处理。在灌浆期,D<sub>1</sub>处理的生物量明显高于X<sub>1</sub>处理,X<sub>3</sub>处理高于D<sub>3</sub>处理,而X<sub>2</sub>和D<sub>2</sub>处理差异不显著。到收获期,滴灌中高灌水量处理的生物量明显高于对应灌水量的常规灌溉处理,而X<sub>1</sub>和D<sub>1</sub>处理差异不显著。

利用效率均表现为先增加后降低的趋势。与常规灌水方式相比,滴灌条件下的小麦穗长、小穗数、穗粒数、耗水量、产量及水分利用效率均较高。滴灌条件下,小麦产量和水分利用效率分别比常规灌溉相应灌水量提高了21.6%,28.0%,24.5%和24.4%,36.7%,30.0%。

2.8 小麦不同生育期不同土层水分贡献率与其周年产量和水分利用效率的相关性分析

从表 5 中可知,小麦不同生育期不同土层水分贡献率与二者产量及水分利用效率存在一定的相关关系。小麦生长过程中,小麦抽穗期 0—20 cm 土层水分贡献率和灌浆期 80—100 cm 土层的水分贡献率对于其产量与水分利用效率的提高更为有利。

表 4 不同灌溉方式不同灌水量对小麦生长、产量及水分利用的影响

处理	株高/ cm	穗长/ cm	小穗数/ 个	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	耗水量/ mm	产量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg · mm <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )
X <sub>1</sub>	53.4d	6.3c	17.9c	31.1d	47.4bc	144.2d	4500.2e	31.2c
X <sub>2</sub>	65.2a	8.8ab	19.9ab	44.9b	50.9a	181.1b	5361.4d	29.6cd
X <sub>3</sub>	62.4b	8.7ab	18.4bc	39.9c	47.6bc	209.4a	4528.0e	21.6e
D <sub>1</sub>	60.2c	8.4b	19.1b	49.1a	46.6c	140.9d	5472.5c	38.8b
D <sub>2</sub>	64.6a	9.4a	20.5a	48.2a	49.9a	169.6c	6861.5a	40.5a
D <sub>3</sub>	60.7c	8.8ab	19.2b	43.0b	47.9b	200.6a	5639.2b	28.1d

表 5 小麦不同生育期不同土层水分贡献率与其周年产量和水分利用效率的相关性

时期	指标	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
拔节期	产量	-0.322	0.262	0.524	0.536	0.457
	水分利用效率	-0.154	-0.154	0.204	0.188	0.362
抽穗期	产量	0.724*	0.136	-0.581	-0.527	0.242
	水分利用效率	0.818*	-0.216	-0.408	-0.108	-0.052
灌浆期	产量	0.088	-0.039	-0.337	0.437	0.627*
	水分利用效率 WUE	0.099	-0.012	-0.408	0.509	0.711*

3 讨论与结论

研究不同灌溉方式对土壤水分氢、氧同位素在土体和根系中的丰度分布,可确定水分进入土体不同土层与作物根系吸收利用的关系<sup>[3]</sup>,从而对作物进行合理的灌水,减少作物的奢侈耗水与无效蒸发。本研究发现,不同灌溉方式均改善了水分在剖面上的分布,与常规灌溉相比,滴灌后的水分在土壤剖面上分布的更为均匀,且滴灌条件下的土壤剖面含水率较高,具有较高的土壤储水量。说明,滴灌后水分缓慢湿润了土壤,保持了良好的土壤结构,从而有效保持了土壤水分和维持了土壤较高的水分含量<sup>[11]</sup>,促进作物生长。在小麦生长期,通过分析氢氧同位素在土壤剖面的分布曲线与根系中氢氧同位素丰度的交点发现:在常规灌溉条件下,在拔节期和抽穗期根系主要吸水层为 0—15 cm,滴灌条件下其根系主要吸收了 0—20 cm 土层的水分;到灌浆期,在常规灌溉条件下,根系吸水有逐渐向土层深处增加的趋势,增加灌水量可以有效促进根系向更深土层生长,促进增加根系的吸水空间与吸水面积。这与邓振镛等<sup>[12]</sup>研究结果一致。在滴灌条件下,适宜的灌水量(30 mm/次)更易使得根系在土体中吸收水分,促进根系分布更为合理。

利用 IsoSource 模型进行不同土层土壤和植物根系中的同位素分析研究发现,在小麦不同生育,不同土层对小麦水分吸收的贡献比例存在一定差异。在拔节期,表层水分供应占明显优势,均到达了 70.5%~87.5%,其他土层水分贡献比例均低于 10%。

而到抽穗期,在滴灌高灌水量条件下(45 mm/次),其 0—60 cm 土层的水分贡献比例明显高于 60—100 cm 土层,而中低灌水条件下(15 mm/次和 30 mm/次),仍以表层水分供应为主。在常规灌溉条件下,低水处理(15 mm/次)60—80 cm 土层的水分贡献达 53.9%。而中高水(30 mm/次和 45 mm/次)处理小麦的最大耗水贡献土层为 0—20 cm 和 40—60 cm。到灌浆期,在常规灌溉条件下,中低灌水处理主要利用了 0—60 cm 土层的水,而高灌水处理以 40—60 cm 土层的水分贡献率最大,达 73.9%。而滴灌中低灌水处理(15 mm/次和 30 mm/次)不同土层的水分贡献较为均匀,分别介于 7.1%~27.8%和 13.0%~38.2%之间,这更有利于作物根系对水分的吸收与利用。而高灌水处理以 20—40 cm 土层水分贡献率最大,占 51.0%,这可能与过高的水分供应促使该土层分布了更多的根系所致,有待进一步深入研究。

蒲金涌等<sup>[13]</sup>在甘肃黄土高原发现,冬小麦生长发育期间,土壤耗水量最大时段为孕穗—成熟期,其次为冬前生长期,返青—拔节期耗水量最小。而本研究发现,冬小麦耗水强度较大的时期为拔节—抽穗和灌浆—收获期,播种—拔节期耗水强度较小,这可能与小麦品种或灌水方式及所处的环境条件不同所致。随灌水量的增加,小麦日耗水量呈增加趋势,且除灌浆—收获期高水处理(45 mm/次)外,滴灌均有效降低了小麦的日耗水量。说明,在小麦籽粒干物质积累的关键生育期—灌浆期,适量滴灌更能促进不同土层根系吸收利用水分的能力,从而减少了水分的无效蒸散和垂直渗

漏。因此,与常规灌溉相比,滴灌更利于降低作物耗水量,提供作物有效的水分以供其正常生长。

由于滴灌可改善土壤水分分布状况和田间小气候,从而促进作物光合生理特征得到改善。张涛等<sup>[14]</sup>对春小麦和位国峰等<sup>[15]</sup>对冬小麦研究发现,滴灌均有利于提高小麦的光合速率、气孔导度及蒸腾速率。本研究发现,与常规灌溉相比,滴灌更利于提高小麦的光合速率、气孔导度、蒸腾速率的提高,且叶片水分利用效率也相应提高,其中以30 mm/次灌水量时光合速率和蒸腾速率均最高,说明适宜的灌水量可以改善小麦叶片的光合生理特性,促进小麦的干物质积累,提高了其籽粒产量,且籽粒水分利用效率也相应得到了提高<sup>[16]</sup>。在滴灌条件下,小麦产量和水分利用效率分别比常规灌溉相应灌水量提高了21.6%,28.0%,24.5%和24.4%,36.7%,30.0%。说明滴灌的节水增产效果显著,而适量灌水效果更佳<sup>[17-18]</sup>,均以中等灌水量(D<sub>2</sub>,30 mm/次)的效果最优,这与位国峰等<sup>[15]</sup>研究结果一致。相关性分析表明:在小麦生长过程中,抽穗期0—20 cm和灌浆期80—100 cm土层水分贡献率对小麦产量与水分利用效率的提高更为有利。因此,在小麦水分田间管理中应适当控制灌水量,在小麦抽穗期保持较高的土壤表层水分含量和适当提高灌浆期底层土壤水分的含量,更利于实现小麦的节水增产。

#### 参考文献:

- [1] 李晖,周宏飞.稳定性同位素在干旱区生态水文过程中的应用特征及机理研究[J].干旱区地理,2006,29(6):810-816.
- [2] 田日昌,陈洪松,宋献方,等.湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征[J].环境科学,2009,30(9):2747-2754.
- [3] 王晶晶.土壤作物系统中水分及其氢氧稳定同位素的动态与农田耗水特征[D].北京:中国农业大学,2015.
- [4] 郭佳宾,苗澍,徐冰,等.滴灌紫花苜蓿根层水分稳定同位素特征分析[J].灌溉排水学报,2017,36(7):14-27.
- [5] Zhao X, Li F D, Ai Z P, et al. Stable isotope evidences for identifying crop water uptake in a typical winter wheat-summer maize rotation field in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018,618:121-131.
- [6] Zhang Y C, Shen Y J, Sun H Y, et al. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micrometeorologic approach[J]. Journal of Hydrology, 2011,408(3):203-211.
- [7] 吴友杰.基于稳定同位素的覆膜灌溉农田 SPAC 水分传输机制与模拟[D].北京:中国农业大学,2017.
- [8] Guo F, Ma J J, Zheng L J, et al. Estimating distribution of water uptake with depth of winter wheat by hydrogen and oxygen stable isotopes under different irrigation depths[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016(15):891-906.
- [9] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003,136(2):261-269.
- [10] Ruppenthal M, Oelmann Y, Wilcke W. Isotope ratios of nonexchangeable hydrogen in soils from different climate zones[J]. Geoderma, 2010,155(3/4):231-241.
- [11] 周加森,马阳,吴敏,等.不同水肥措施下的冬小麦水氮利用和生物效应研究[J].灌溉排水学报,2019,38(9):36-41.
- [12] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响[C].中国气象学会年会,2011:5281-5290.
- [13] 蒲金涌,王润元,李晓薇,等.甘肃黄土高原土壤水分变化对冬小麦产量的影响[J].地理学报,2012,67(5):710-718.
- [15] 张涛,马富裕,郑重,等.滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响[J].西部农业学报,2010,19(6):69-73.
- [15] 位国峰,刘义国,姜雯,等.不同滴灌制度对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J].华北农学报,2013,28(5):149-156.
- [16] Li H R, Mei X R, Wang J D, et al. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: a meta-analysis in China[J]. Agricultural Water Management, 2021,244:106534.
- [17] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002,55:203-216.
- [18] Shen X J, Wang G S, Zeleke K T, et al. Crop water production functions for winter wheat with drip fertigation in the North China Plain[J]. Agronomy, 2020,10:876.