

黄土塬区旱作冬小麦土壤水分利用特征的 稳定同位素分析

程立平¹, 齐光¹, 李彦娇¹, 刘文兆²

(1.平顶山学院, 河南 平顶山 467000;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过对长武黄土塬区遮雨样地和自然样地 3 m 深度土壤水标记氘水(D_2O), 并测定旱作冬小麦不同生育期茎秆水、降水、不同土层土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值, 利用稳定同位素技术明确旱作冬小麦能否利用 3 m 深度土壤水分, 并定量分析其对不同土层土壤水分利用比例及对降雨量减少的响应。结果表明: (1) 旱作冬小麦自开花—灌浆期开始利用 3 m 深度土壤水分, 其对各层土壤水分的利用强度具有随深度增加而减小的趋势; (2) 抽穗期至乳熟期, 0—50 cm 土壤水对冬小麦耗水的贡献率为 28.0%~36.7%, 50—100 cm 土壤水为 24.7%~32.3%, 100—200 cm 土壤水为 15.7%~22.3%, 200—300 cm 土壤水为 11.4%~17.4%; 300—400 cm 土壤水对灌浆期—乳熟期冬小麦耗水贡献率为 15.6%~16.6%; (3) 降雨量减少没有改变旱作冬小麦对 3 m 深度土壤水分利用的起始时间, 但是提升了其对深层土壤水分的利用强度, 以满足生育耗水的需求。黄土塬区深层土壤储水对于保障冬小麦水分供给具有重要意义, 生产实践中需要做好夏闲期蓄水保墒措施, 促使深层土壤水分恢复, 保证土壤水库调蓄功能的持续发挥。

关键词:黄土塬区; 土壤水分; 氢氧同位素; IsoSource 模型

中图分类号: S152.7, S314

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0170-07

Stable Isotope Analysis of Soil Water Utilization by Winter Wheat in Dryland of Loess Tableland

CHENG Liping¹, QI Guang¹, LI Yanjiao¹, LIU Wenzhao²

(1. Pingdingshan University, Pingdingshan, He'nan 467000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this paper, soil water at the depth of 300 cm both in the rain cover plot and the natural plot in Changwu Loess Tableland were marked by deuterium water, and the δD and $\delta^{18}O$ values of wheat stem water, rainwater and soil water samples in different layers in different growth stages of winter wheat were measured to determine whether winter wheat can use the soil water in 300 cm depth. Further, the utilization of soil water in different soil layers by winter wheat in dryland and its response to the reduction of precipitation were analyzed. The results show that: (1) winter wheat begins to use soil water in 300 cm depth since the flowering-filling stages, and the utilization of soil water in different soil layers decrease with the increase of soil depth; (2) from the heading stage to the milk, the contribution rates of soil water in 0—50 cm, 50—100 cm, 100—200 cm and 200—300 cm layer to the water consumption of winter wheat were 28.0%~36.7%, 24.7%~32.3%, 15.7%~22.3% and 11.4%~17.4%, respectively, and the contribution rate of soil water in 300—400 cm depth was 15.6%~16.6% during the filling and milk ripening stages; (3) reduction of precipitation dose not change the time of winter wheat use soil water in 300 cm depth, but increases the utilization rate of soil water from deep soil layer, so as to meet the water demand during the growing period. Overall, soil water storage in deep layer is significant for winter wheat in dryland of the loess tableland. Therefore, it is necessary to take effective measures to improve the soil water storage during the fallow period in summer

收稿日期: 2020-07-23

修回日期: 2020-08-01

资助项目: 国家自然科学基金“黄土塬区深剖面土壤水分平衡和地下水补给对土地利用/覆被变化的响应”(41771036); “基于氢氧稳定同位素技术的黄土塬区深层土壤水对冬小麦生育耗水的贡献研究”(41401015)

第一作者: 程立平(1981—), 男, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 主要从事农业生态水文方向研究。E-mail: lpchengnwu@163.com

in production practice, so as to promote the recovery of soil water in deep layer and maintain sustainable regulation and storage function of the soil reservoir.

Keywords: loess tableland; soil water; stable hydrogen and oxygen isotopes; IsoSource model

黄土塬区土壤供水占旱作冬小麦耗水量的一半左右,土壤水库调蓄功能可有效缓解降水不足和季节分布不均所导致的旱情,对冬小麦生长发育以及稳产高产具有重要的意义^[1-2]。试验观测发现黄土区旱作冬小麦根系可深达 3 m 以下^[3],但是根系能否利用土壤水还与根系密度和活性相关^[4],因此冬小麦能否利用 3 m 深度土壤水仍缺乏直接证据。有关研究多将 2 m 或 3 m 以内土壤水分作为整体研究其与冬小麦耗水之间的关系^[5-6],较少关注冬小麦对不同土层土壤水分的利用特征,而同位素水分溯源技术则为定量研究植物对不同土层水分利用特征提供了可能^[7]。植物根系从土壤中吸收水分和水分在植物体内运输到达叶片或幼嫩未栓化的枝条之前均不发生同位素分馏^[8],植物茎干水同位素组成是其所利用水源同位素组成的综合体现。要定量研究植物各水源的利用比例,可采用二源/三源线性混合模型^[9],但该模型不能用确定多于 3 个以上水源, IsoSource 多源混合模型^[10]则可用于估算多个水源对植物用水的贡献比例范围。随着同位素示踪技术的发展,已有学者开展了冬小麦水分溯源的试验研究。如有灌溉条件且地下水埋深较浅地区的冬小麦的水分利用规律^[11-12],地下水埋藏较深地区 0~2 m 深度内不同土层土壤水对冬小麦耗水的贡献^[13],以及田间土柱种植试验中发现冬小麦自抽穗—灌浆期起开始利用 2~3 m 土层土壤水^[14]。但是鲜有研究关注黄土区旱作冬小麦对 3 m 深度土壤水分的利用问题,尤其是降水不足的条件下,因此本文首先利用遮雨棚遮雨模拟降雨量减少情景,其次对遮雨样地和自然样地 3 m 深度土壤水标记氘水(D₂O),通过测定不同日期冬小麦茎秆水 δD 值以确定冬小麦是否利用 3 m 深度土壤水分;并通过测定冬小麦不同生育期茎秆水、降水和 0~4 m 土壤剖面不同土层土壤水 $\delta^{18}O$ 值,定量分析旱作冬小麦对不同土层土壤水分的利用特征及其对降雨减少的响应,为旱地农田水分研究和管理服务。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院长武农业生态试验站(35°14'N, 107°40'E)所在的长武黄土塬区进行,位于陕西省长武县,塬面平坦,海拔 1 220 m。研究区属暖温带半湿润易旱大陆性季风气候,多年平均降水量 580 mm,降水年际

变化较大,年内分布不均,7—9 月降水量占全年降水总量的 55%以上。研究区黄土堆积深厚,土壤为黑垆土,田间持水量和凋萎湿度分别为 22%(质量含水量,下同)和 9%,容重为 1.3 g/cm³,母质为中壤质马兰黄土,土质疏松,孔隙度在 50%左右,通透性良好,利于水分入渗和植物根系生长。研究区地下水埋深 40~80 m,不参与土壤—植物水分循环。

1.2 试验设计

2015 年 9 月下旬在长武站水肥耦合试验场选择 2 个小区(3 m×4 m)种植小麦进行试验(品种:长旱 58),小麦播种量 150 kg/hm²,播前一次性深翻施氮肥(尿素,150 kg/hm²)和磷肥(五氧化二磷,90 kg/hm²)。2016 年 5 月 9 日起至小麦收获(6 月下旬)对 2 号小区进行人工遮雨处理,即雨前将遮雨棚推至小区上方遮雨,雨后推离,模拟降雨量减少情景;1 号小区接收正常降雨。5 月 9 日在 1 号样地(记为 A 样地)和 2 号样地(记为 B 样地)中心位置选择约 1 m²样方,利用土钻于四角处钻至 3 m 深度,钻孔直径约 5 cm,利用软管将 D₂O(99.8%)注入孔底进行标记,为尽量减小水分输入对土壤湿度的扰动又能标记成功,每个钻孔约注入 12 ml 氘水,然后分层回填。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集 于 2016 年 5 月 9 日(抽穗期),5 月 19 日(开花期),5 月 29 日(灌浆期)和 6 月 10 日(乳熟期)在氘水标记样方内使用土钻采集 0—4 m 剖面土壤样品,间隔 20 cm。因标记样方面积小,为减少扰动,每次只取一个土壤剖面。土壤样品分为两份,一份装入铝盒利用烘干法(105℃,12 h)测定土壤含水量;另一份密封于高密度聚乙烯瓶中保存,实验室内利用低温真空抽提系统 Li-2000 抽提土壤水样,将抽提的水样密封于玻璃水样瓶中,编号、记录并冷藏待测。

1.3.2 小麦茎秆水样采集 为明确冬小麦是否利用以及何时利用 3 m 深度以下土壤水分,除在采集土壤样品日期,又分别于 5 月 13 日、5 月 24 日和 6 月 4 日在 D₂O 标记样方内采集冬小麦样品。采集方法为随机选择 3 株长势良好冬小麦连根拔起,采集近根部的茎秆,迅速剔除叶鞘部分,装入 10 ml 玻璃瓶内密封保存,每次采集 3 瓶作为重复,实验室内利用低温真空抽提系统 Li-2000 抽提小麦茎秆水样,将抽提的水样密封于玻璃水样瓶中,编号、记录并冷藏待测。

1.3.3 降水样品采集 利用人工雨量筒收集次降水水样,并记录降水量。

1.3.4 水样氢氧稳定同位素测定 小麦水样 δD 值测定:采用 LGR IWA-45 EP 液态水同位素分析仪测定抽提小麦水样的 δD 值,分析精度为 $\pm 0.5\text{‰}$ 。土壤、小麦和降水水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值测定:采用质谱仪 Finnigan MAT253, TC/EA 法测定水样内 $\delta^{18}\text{O}$ 值,分析精度为 $\pm 0.3\text{‰}$ 。所有水样 δ 值测定结果用 V-SMOW 标准校正。

通过对比不同日期冬小麦茎秆水 δD 值变化可以确定冬小麦利用 3 m 深度土壤水分的时间;将冬小麦不同生育期茎秆水、降水和 0—4 m 土壤剖面不同土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值输入 IsoSource 模型,可定量分析冬小麦对不同土层土壤水分的利用特征。

1.3.5 土壤储水量计算 土壤储水量计算公式为:

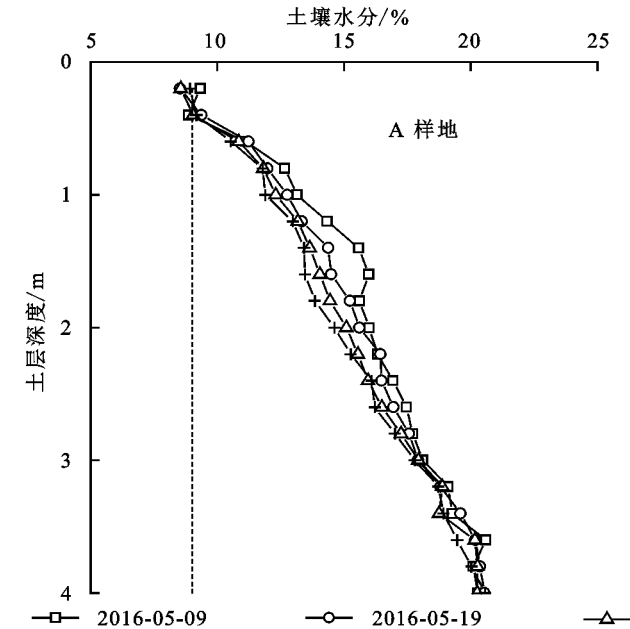
$$W=\sum_{i=1}^n\theta_i\times\rho\times h_i\times 10$$

式中: W 为土壤储水量(mm); θ 为土壤质量含水量(g/g); ρ 为土壤容重(g/cm³); h 为土层厚度(cm)。

1.3.6 水量平衡方程 黄土塬区水量平衡计算公式一般被简化为:

$$ET=P-\Delta W$$

式中:ET 为蒸散量(mm); ΔW 为土壤储水量的变化量(mm); P 为降水量(mm)。



1.4 数据处理

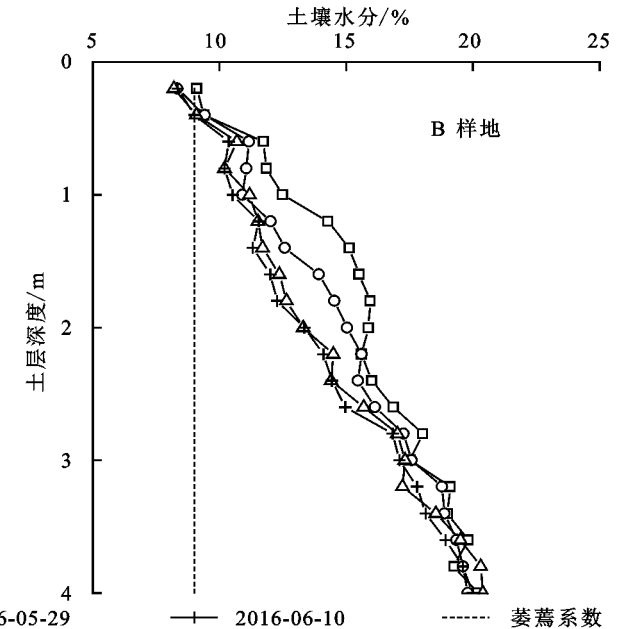
利用 IsoSource 多源线性混合模型(V1.3.1)计算不同水源对冬小麦耗水的贡献比例,IsoSource 模型参数中的来源增量(source increment)设置为 2%,质量平衡公差(mass balance tolerance)为 1%。

采用 Excel 2007 软件进行数据处理,利用 Origin 2018 制图,利用单因素方差分析比较不同时期土壤水同位素组成差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤储水量变化

由于冬小麦的吸收利用,叠加土壤物理蒸发,至抽穗期两块样地 0—50 cm 土层土壤水分均已低至萎蔫系数(图 1)。试验起始日,A 样地和 B 样地 0—4 m 剖面平均土壤水分含量分别为 15.7%和 15.5%,土壤水分剖面分布近乎一致。但是随着冬小麦生育期推进,两块样地 50 cm 深度以下土壤水分剖面均向左移动,土壤含水率降低,试验终止时分别降低至 15.1%和 14.2%,出现明显差异。研究期内,虽然 A 样地蒸散量(91.5 mm)大于 B 样地蒸散量(78.9 mm),但是由于 A 样地降水输入为 50.8 mm,其土壤储水量仅减少了 40.7 mm,较 B 样地减小量少 38.2 mm。说明降水量减少条件下,冬小麦能够利用更多土壤储水满足生育耗水需求,缓解旱情。



2.2 不同水样 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

研究期内降水 $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 -8.26‰ ,最大值为 -2.96‰ ,平均值为 -5.39‰ (图 2),与研究区多年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -10.38‰ [15] 相比明显富集,原因在于长武黄土塬区降水同位素组成具有冬春富集、夏秋

图 1 土壤水分剖面动态变化

贫化的年内变化特征。

受蒸发效应影响,浅层土壤水分重同位素富集[16]。A 样地土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 20 cm 处最大,20—280 cm 深度范围内随深度增加而减小,280 cm 以下随深度增加而逐渐增加,4 个采样日土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为

—12.17‰, —12.03‰, —12.49‰和—12.45‰, 方差分析表明其无显著差异(图 3A)。B 样地土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值同样在 20 cm 处最大, 20—120 cm 深度范围内随深度增加而减小, 120 cm 以下基本保持稳定, 4 个采样日土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为—10.11‰、—10.04‰, —10.31‰和—9.98‰, 无显著差别(图 3B)。

5 月 9 日、5 月 19 日、5 月 29 日和 6 月 10 日, A 样地冬小麦茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为(-9.16 ± 0.57)‰, (-9.82 ± 0.39)‰, (-10.37 ± 0.35)‰和(-10.02 ± 0.51)‰, 平均值为(-9.84 ± 0.58)‰(图 3A); B 样地冬小麦茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为(-8.99 ± 0.13)‰, (-10.59 ± 0.23)‰, (-10.60 ± 0.39)‰和(-10.30 ± 0.29)‰, 平均值为(-10.10 ± 0.72)‰(图 3B)。植物根系吸收水分过程不发生同位素分馏现象, 因此植物

水的同位素组成是其所利用水源同位素组成的综合反应。虽然 A 样地土壤水同位素组成较 B 样地偏负, 但是由于 A 样地冬小麦能够利用同位素组成偏正的降水, 其茎秆水同位素组成却偏正一些。

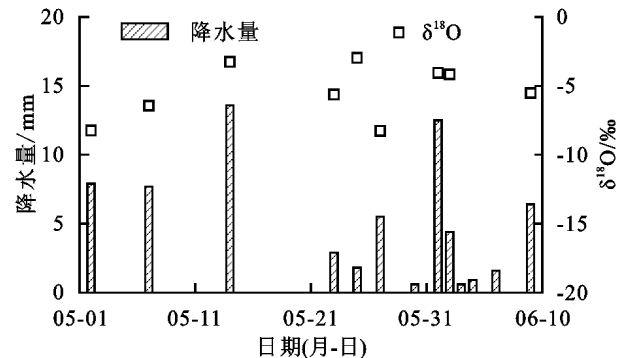


图2 研究时段内降水量及降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

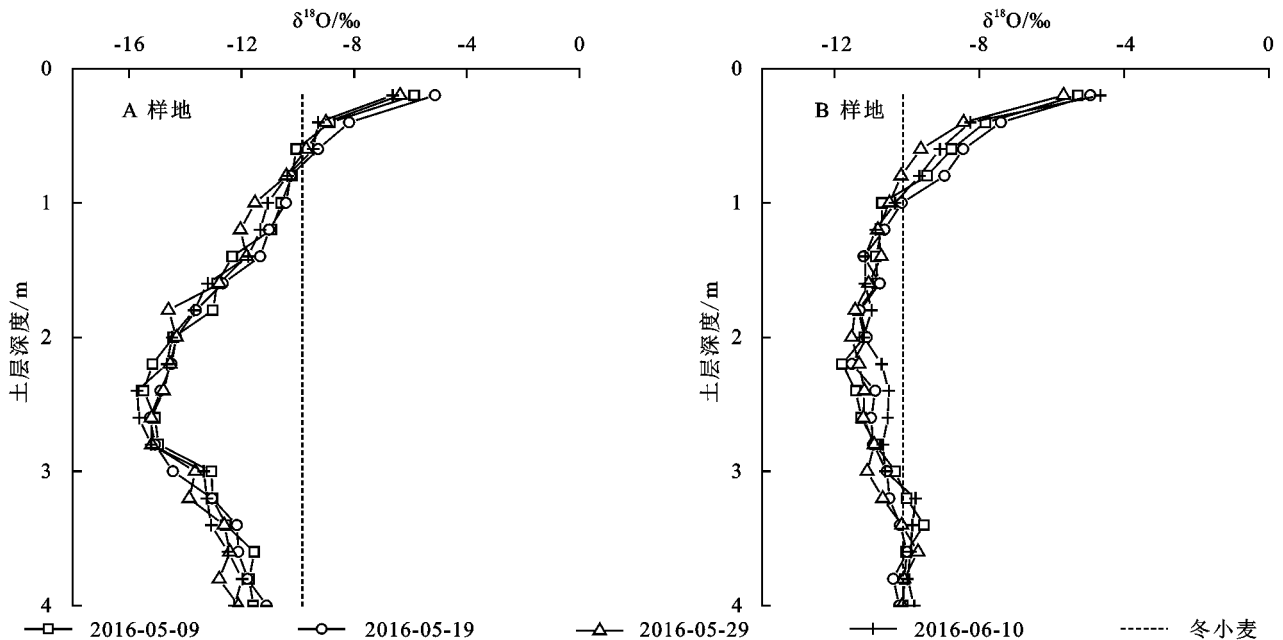


图3 土壤水及冬小麦茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

2.3 冬小麦对 3 m 深度土壤水的利用

尽管液态水同位素仪 LGR 在测定植物水 δD 值时存在甲醇或乙醇类有机污染^[17], 但是其测试结果仍然可以为冬小麦是否利用了标记在 3 m 深度处的氘水提供有效信息。表 1 给出了不同日期两块样地冬小麦茎秆水的氢同位素组成变化。可以发现截至 5 月 19 日无论是 A 样地还是 B 样地, 冬小麦茎秆水 δD 值均没有富集; 但是从 5 月 24 日起至 6 月 10 日, 两块样地冬小麦茎秆水 δD 值发生了明显富集, 表明冬小麦已经开始利用标记在 3 m 深度处的氘水。因为冬小麦为随机采样, 因此距离钻孔较近的小麦茎秆水 δD 值大, 距离较远的冬小麦茎秆水 δD 值小。进一步对比两块样地冬小麦茎秆水 δD 值发现, B 样地较 A 样地富集程度高, 表明虽然两块样地冬小麦几乎在同一时间开始利用 3 m 深度土壤水分, 但是在

降水量减少条件下冬小麦能够吸收利用更多的深层土壤水分来满足耗水需要。

2.4 冬小麦土壤水分利用规律

黄土塬区地下水埋藏极深, 因而旱作冬小麦生长发育仅能依赖降水和土壤水。研究时段属于旱季、降水较少, 5 月 1 日至 6 月 10 日共记录到 13 个降水日, 但是降水量大于 5 mm 的有效降水仅 6 次(图 2), 最大日降水量仅为 13.6 mm, 很难入渗至 20 cm 深度土层。本试验中土壤水分测定从 20 cm 开始, 所以图 1 中表现出两块样地 0.5 m 以上土层含水率与萎蔫系数持平, 几乎没有变化, 意味该层土壤水分已不能为冬小麦所吸收利用。对于 B 样地, 冬小麦只能利用 0.5 m 深度以下土壤水分。对于 A 样地, 降水转化的土壤水集中在 0—20 cm 深度范围以内, 研究表明冬小麦能够优先利用降水转化而来的土壤水,

然后才利用土壤前期储水^[18],同时冬小麦根系密度在此范围以内最大,所以该地块冬小麦能够直接利用降水转化而来的土壤水。由冬小麦茎秆水样 δD 值变化可知,两块样地冬小麦在 5 月 24 日起已经利用 3 m 深度土壤水分。因此,本文根据土壤水同位素剖面分布特征,在抽穗期和开花期将 50—300 cm 土层分为 3 组,分别是 50—100 cm,100—200 cm 和 200—300 cm;在灌浆期和乳熟期将 50—400 cm 土层分为 4 组,分别是 50—100 cm,100—200 cm,200—300 cm 和 300—400 cm。研究表明干旱地区

植物体内在降水之后的 7 日内仍保存有大量的降水^[19],因此本文分别利用 5 月 8 日、5 月 13 日、5 月 27 日和 6 月 9 日降水代替 0—50 cm 土层土壤水,来计算不同生育期 A 样地冬小麦对 0—50 cm 土层土壤水(降水)的利用比例,四日降水量分别为 7.7 mm,13.6 mm,5.5 mm 和 6.4 mm,降水 $\delta^{18}O$ 值分别为 -6.03‰ , -4.72‰ , -6.57‰ 和 -5.67‰ 。最后将冬小麦不同生育期茎秆水以及各组土壤水 $\delta^{18}O$ 值分别输入 IsoSource 模型,计算旱作冬小麦对各层土壤水分的利用比例。

表 1 冬小麦茎秆水样 δD 值							%
日期	5-9	5-13	5-19	5-24	5-29	6-4	6-10
A 样地	-66.83	-55.35	-61.31	150.87	-39.69	-41.20	NaN*
	-59.79	-61.31	-62.87	-54.52	NaN*	-34.17	-47.50
	-64.40	-59.30	-57.19	-60.55	-38.28	-33.77	588.56
	-64.83	-55.53	-62.77	575.89	586.23	-44.51	1285.78
B 样地	-61.92	-55.83	-52.24	-57.04	NaN*	14.49	-39.67
	-65.10	-57.44	-67.60	-51.77	-54.28	NaN*	NaN*

注: * 表示水样中氢同位素太富集未能测出。

IsoSource 模型最终结果不是唯一解,而是依据计算过程中各水源相对贡献率的频率确定可行的概率分布组合^[10],即冬小麦对各水源利用比例的分布范围,具有一定的不确定性,可利用各潜在水源相对贡献率的频率加权平均值作为唯一解的体现(图 4)。抽穗期,0—50 cm 土壤水(降水),50—100 cm,100—200 cm,200—300 cm 土壤水对 A 样地冬小麦耗水

的贡献率分别是 36.7%,29.9%,20.6%和 12.8%,对 B 样地冬小麦耗水的贡献率分别为 33.4%,27.9%,20.4%和 18.3%。可以发现,虽然两块样地同一土层土壤水对冬小麦耗水贡献率有所差异,但是冬小麦对各层土壤水分的利用状况表现出了相同的规律,即冬小麦对不同土层土壤水分的利用强度随土层深度的增加而减小。

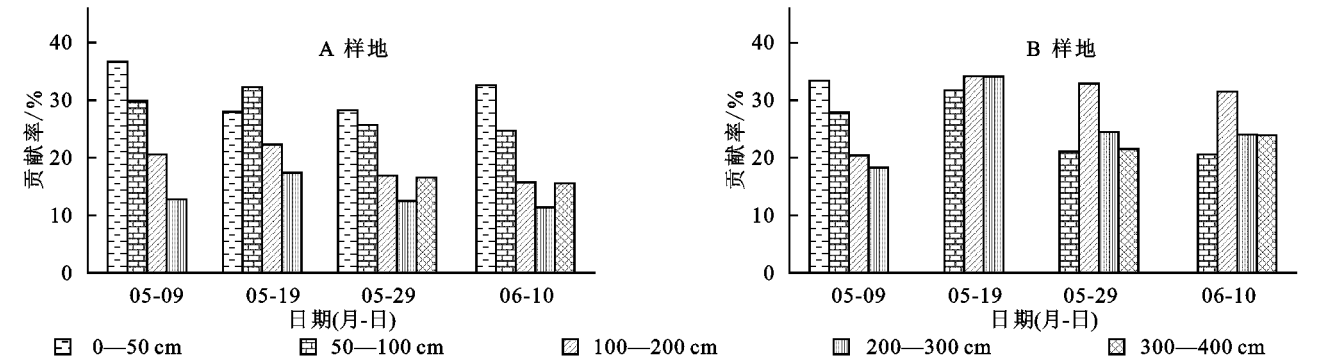


图 4 不同生育期各层土壤水对冬小麦耗水的贡献率

A 样地冬小麦开花期、灌浆期和乳熟期的土壤水分利用规律与抽穗期一致,利用强度随深度增加而减小,但是各层水分对冬小麦耗水的贡献率在不同生育期不同。图 4A 可知 0—50 cm 土壤水(降水)对开花期、灌浆期和乳熟期冬小麦耗水的贡献率分别为 28.0%,28.3%和 32.6%,50—100 cm 土壤水的贡献率分别为 32.3%,25.7%和 24.7%,100—200 cm 土壤水的贡献率分别为 22.3%,16.9%和 15.7%,200—300 cm 土壤水的贡献率分别为 17.4%,12.5%和 11.4%。冬小麦自开花—灌浆期间开始利用 3 m 深度土壤水分,300—400 cm 土层土壤水对灌浆期—乳熟期冬小麦耗水的贡献率为 15.6%~16.6%。

雨量减少条件下,冬小麦需要利用更多的深层土壤储水来满足生育耗水的需要。由于 0—50 cm 土层土壤含水率与萎蔫系数持平且没有降水输入,B 样地深层土壤水分对冬小麦耗水的贡献率相较 A 样地大幅增加。50—100 cm 土壤水对开花期、灌浆期和乳熟期冬小麦耗水的贡献率分别为 31.7%,21.1%和 20.6%,100—200 cm 土壤水的贡献率分别为 34.2%,32.9%和 31.5%,200—300 cm 土壤水贡献率分别为 34.1%,24.5%和

24%。300—400 cm 土层土壤水在灌浆期—乳熟期间的平均贡献率为 22.7%。冬小麦对深层土壤水分利用强度的增加,导致深层土壤储水消耗增加。计算得知,A 样地 200—400 cm 土层土壤储水量减少 18.7 mm,B 样地则减少了 27.4 mm。

3 讨论

相较于地下水浅埋地区及灌区冬小麦可利用的众多水源(降水、土壤水、灌溉水和地下水)^[11-12],黄土塬区旱作冬小麦能够利用的水源只有降水和土壤水。降水对抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期冬小麦耗水的贡献率分别为 36.7%,28.0%,28.3%和 32.6%(图 4A),受降水时间以及降水量的显著影响^[19]。随着生育期的延伸和根系下扎,冬小麦根系吸水峰不断向深层土壤移动^[20-21]。在地下水埋深较浅的封丘地下冬小麦从孕穗期开始利用埋深在 3 m 以下的地下水^[12],而在干旱半干旱的山西省南部地区,旱作冬小麦则自抽穗期起开始利用 2~3 m 土层土壤水^[14]。相关试验观测发现,长武塬区冬小麦越冬前根系可扎至 60 cm 深度,返青期已生长至 250~280 cm 深度,至收获前依然继续向下延伸^[3]。本研究氘水标记试验表明长武塬区旱作冬小麦在开花—灌浆期间开始利用 300 cm 深度土壤水分,且该时间点未受降雨量减少的影响。说明,该区旱作冬小麦根系在开花—灌浆期已生长至 300 cm 深度以下,且抽穗期以后的降水量减少不会对作物根系下延生长造成影响。

冬小麦对土壤水分的利用状况取决于土层中根系分布量、根系吸水速率及土壤含水量,但是与土壤水分状况相比,根系在作物吸水过程中起着控制作用,尤其在土壤干旱条件下作用更大^[20],冬小麦根系在土壤剖面上的分布呈指数递减^[21],因此冬小麦对浅层土壤水分利用强度大于深层土壤水分,但是传统方法仅是定性描述。本文利用 IsoSource 得出不同土层土壤水分对冬小麦耗水的贡献率随深度增加而减小(图 4A),从定量角度表明冬小麦对各层土壤水分利用强度具有随深度增加而减小的趋势。深根习性的植物能够吸收更深层水分以避免干旱影响^[8,22],而深层土壤水分利用能力使植物克服水分限制并在无雨期生长成为可能^[23]。由于没有降水可供利用,具有深根习性的旱作冬小麦调整了土壤水分利用策略,提升了对深层土壤水分的利用强度,从而导致深层土壤水对冬小麦耗水贡献率的增加(图 4B)。传统的水量平衡法也观测到了类似的结果,枯水年旱作冬小麦孕穗—抽穗到成熟期,300 cm 以下土层水分消耗率为 15.4%,远高于平水年的 3.9%和丰水年的

5.2%^[24]。可见,黄土塬区深层土壤储水对于缓解降水不足,保障冬小麦水分供给具有重要意义。

4 结论

氘水标记表明,旱作冬小麦自开花—灌浆期开始利用 3 m 深度土壤水分,且该时间不受降水量减少的影响。冬小麦对各层土壤水分的利用强度具有随深度增加而减小的趋势,0—50 cm 土壤水(降水),50—100 cm 土壤水、100—200 cm 土壤水、200—300 cm 土壤水对抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期冬小麦耗水的平均贡献率分别为 31.4%,28.2%,18.9%,13.5%;300—400 cm 土壤水对灌浆期—乳熟期冬小麦耗水的平均贡献率为 16.1%。冬小麦可通过调整土壤水分利用策略,提升对深层土壤水分的利用强度来响应生育期降水量的减少。降水量减少情况下,50—100 cm 土壤水、100—200 cm 土壤水、200—300 cm 土壤水对开花期、灌浆期、乳熟期冬小麦耗水的平均贡献率分别为 25.3%,29.8%,25.2%;300—400 cm 土壤水对灌浆期—乳熟期冬小麦耗水的平均贡献率为 22.7%。

深层土壤储水能有效缓解降水不足的影响,对旱作冬小麦稳产具有重要意义。因此,生产实践中应通过夏闲期蓄水保墒措施,减少土壤蒸发、增加雨水入渗量和入渗深度,促使深层土壤水分恢复,来保证土壤水库调蓄功能的持续发挥。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2011,31(18):5281-5290.
- [2] 李刚,王亚萍,李超,等.黄土塬区高底塬条件下养分差别对冬小麦产量的影响[J].水土保持研究,2019,26(4):146-150.
- [3] 李玉山,喻宝屏.土壤深层储水对小麦产量效应的研究[J].土壤学报,1980,17(1):43-54.
- [4] Schroth G. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options[J]. Agroforestry Systems, 1998,43(1):5-34.
- [5] 刘为健,杨文稼,王盈盈,等.2 个小麦品种水分利用效率的差异及其与深层水分利用的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):245-251,258.
- [6] 柳玉凤,谢英荷,杨福田,等.夏闲覆盖和种植方式对黄土旱塬小麦产量及土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(4):36-42.
- [7] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002,33(1):507-559.
- [8] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. Plant Cell

- Environ[J]. *Plant Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [9] 于静洁, 李亚飞. 稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 7942-7949.
- [10] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [11] 苑晶晶, 袁国富, 罗毅, 等. 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 360-368.
- [12] 张丛志, 张佳宝, 张辉. 不同深度土壤水分对黄淮海封丘地区小麦的贡献[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 655-664.
- [13] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 等. 基于双稳定同位素和 Mix-SIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6611-6622.
- [14] 安江龙, 马娟娟, 张亚雄, 等. 两种模型分析方法下冬小麦根系吸水深度的对比研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 25-28.
- [15] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 98-106.
- [16] Allison G B. The relations between o-18 and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 163-169.
- [17] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^2\text{H}/^1\text{H}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measured in leaf, stem, and soil water[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry Rcm*, 2011, 25(21): 3360-3368.
- [18] 倪盼盼, 朱元骏, 巩铁雄. 黄土塬区降水变化对冬小麦土壤耗水特性及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 80-87.
- [19] Cheng X L, An S Q, Li B, et al. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in north-western China[J]. *Plant Ecology*, 2006, 184(1): 1-12.
- [20] 冯广龙, 刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析[J]. *自然资源学报*, 1998, 13(3): 235-241.
- [21] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 1992, 20(2): 5-12.
- [22] Chimner R A, Cooper D J. Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis Valley, Colorado U. S. A[J]. *Plant & Soil*, 2004, 260(1): 225-236.
- [23] Wu Y J, Zhou H., Zheng X J, et al. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(26): 6265-6275.
- [24] 李鹏展, 王力, 王棣. 黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3653-3662.

(上接第 169 页)

- [5] 谢炯光, 纪忠萍. 广东前汛期异常旱涝的大气环流特征[J]. *广东气象*, 2001, 23(2): 10-12.
- [6] 林爱兰. 广东前汛期降水预报因子的初步探讨[J]. *广东气象*, 1998, 20(1): 58-61.
- [7] 胡琼文. 广东省前汛期一次暴雨过程的诊断分析[J]. *气象研究与应用*, 2015, 36(6): 26-28.
- [8] 艾卉, 晓绚. 广州市近 55 年暴雨的气候变化特征[J]. *广东气象*, 2018, 40(4): 24-27.
- [9] 李明华, 黄健, 杨柳, 等. 惠州城区 50 年来雨日的气候统计与变化特征[J]. *广东气象*, 2008, 30(2): 27-30.
- [10] 凌良新, 袁振, 陈往溪, 等. 潮州市近 51 a 降水量和暴雨日数的时间变化特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2009, 28(3): 93-97.
- [11] 谭晓伟. 观测系统影响试验与可预报性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2005.
- [12] 林良勋. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 99-125.
- [13] 周禹熹. 软基填方路堤滑坡的形成机制与影响因素分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [14] 龚宇, 花家嘉, 陈昱. 唐山近 50 年不同时间尺度降水变率及降水量变化分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(9): 449-452.
- [15] 郑腾飞, 郭建茂, 尹继福, 等. 基于 DFA 法的江苏省极端降水时空分布特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 76-83.
- [16] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 208-244.