

深层土壤水分对黄土塬区 旱作冬小麦耗水的贡献

程立平¹, 林 文², 王亚萍³, 刘文兆³

(1. 平顶山学院, 河南 平顶山 467000; 2. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801;
3. 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:为研究不同土层尤其是深层土壤水对冬小麦耗水的贡献, 本文首先对长武黄土塬区 300 cm 深度土壤水人工标记氘水, 并通过测定抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期小麦茎秆水 δD 值确定冬小麦是否能够利用 300 cm 深度以下土壤水分; 其次通过测定小麦茎秆水、降水和不同土层土壤水 $\delta^{18}O$ 值, 分析降水以及不同深度尤其是 300 cm 以下土层土壤水对冬小麦耗水的贡献。结果表明: 长武塬区降水分别贡献了旱作冬小麦抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期耗水的 49.2%、30.2%、35.9% 和 38.2%, 土壤水分别贡献了 50.8%、69.7%、64.1% 和 61.8%。50~100 cm、100~150 cm、150~200 cm 和 200~300 cm 土层土壤水贡献了冬小麦抽穗期耗水的 17.9%、15.2%、10.0% 和 7.7%, 开花期耗水的 24.6%、18.8%、14.0% 和 12.4%, 灌浆期耗水的 19.5%、14.4%、10.0% 和 8.7%, 乳熟期耗水的 18.6%、13.2%、10.3% 和 8.3%。冬小麦茎秆水 δD 值变化表明, 冬小麦自灌浆期开始利用 300 cm 深度以下土壤水分, 300~400 cm 土层土壤水贡献了冬小麦灌浆期和乳熟期耗水的 11.4% 和 11.5%。可见, 深层土壤水分对于冬小麦水分供给具有重要意义, 因此生产实践中需要做好夏闲期蓄水保墒措施, 以增加雨水入渗量和入渗深度, 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:旱作冬小麦; 水分来源; 耗水贡献率; 稳定同位素; 黄土塬区

中图分类号:S512.1⁺1; Q945.17 **文献标志码:**A

Contributions of soil water in deep soil layers to water consumption of dryland winter wheat on the Loess Tableland

CHENG Liping¹, LIN Wen², WANG Yaping³, LIU Wenzhao³

(1. Pingdingshan College, Pingdingshan, Henan 467000, China;
2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;
3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest
A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the contributions of water in different soil layers, especially deep soil, on the water consumption of winter wheat, the soil water at the depth of 300 cm was marked by deuterium water, and the δD values of wheat stem water at heading, flowering, filling, and milk-ripening stages were measured to determine whether winter wheat can make use of the soil water below the depth of 300 cm in Changwu Loess Tableland. Additionally, we measured the $\delta^{18}O$ values of wheat stem water, rainwater, and soil water in 0~400 cm soil profile to analyze the contribution rates of rainwater and soil water in different soil layers to water consumption of winter wheat. The results showed that the contribution rates of rainwater to wheat water consumption at heading, flowering, filling, and milk-ripening stages were 49.2%, 30.2%, 35.9%, and 38.2%, respectively, and these of soil water were 50.8%, 69.7%, 64.1%, and 61.8%, respectively. The contribution rates of soil water stored in different soil layers (50~100 cm, 100~150 cm, 150~200 cm, and 200~300 cm depths) to wheat water consumption were 17.9%, 15.2%, 10.0%, and 7.7% at heading stage, 24.6%, 18.8%, 14.0%, and 12.4% at flowering stages,

19.5%, 14.4%, 10.0%, and 8.7% at filling stages and 18.6%, 13.2%, 10.3%, and 8.3% at milk-ripening stage, respectively. The variation of δD values of stem water indicated that winter wheat began to use soil water storage below the depth of 300 cm since the filling stages. And the soil water stored in 300~400 cm deep contributed 11.4% and 11.5% to winter water consumption at filling and milk-ripening stage, respectively. Overall, soil water storage in the deep layer was a significant water supply to dryland winter wheat in Loess Tableland. Therefore, it is necessary to take effective measures in water storage and conservation, as well as increase the amount and depth of rain-water infiltration during the summer fallow period in production practice, so as to promote the recovery of soil water in deep layer and maintain the sustainable regulation and storage function of soil reservoir.

Keywords: dryland winter wheat; moisture source; contribution rate of water consumption; stable isotope; Loess tableland

黄土高原南部的黄土塬区是我国北方重要的旱作冬小麦产区,基于其独特的地形、水文、气候等环境条件,冬小麦所能利用的水源只有降水和土壤水,土壤供水可占冬小麦生长期耗水量的一半左右。土壤水库调蓄水分功能可有效缓解降水不足和季节分布不均所导致的旱情,对于该区冬小麦生长发育至关重要,特别是在拔节-抽穗-灌浆期的高需水阶段^[1-2]。良好的底墒和土壤水库的调蓄功能对于提高旱作冬小麦水分利用效率、稳定冬小麦产量具有重要的意义。已有的研究多将0~2 m或0~3 m土层储水作为整体,研究其对冬小麦耗水及产量形成的贡献^[2-4],而不同土层土壤储水对冬小麦耗水的贡献,尤其是深层土壤水的贡献尚不明确。有研究通过对比发现,黄土塬区高产麦田0~5 m深度范围内土壤水分含量低于长期休闲地,并结合根系分布推测冬小麦根系直接吸水层为3 m,3 m以下土壤水分减小是水分上移的结果^[5];但是小麦高产所形成的土壤干层能使降水入渗深度显著变浅^[6],深层土壤补给来水减少,亦有可能使高产麦田3 m以下范围内土壤湿度降低。可见黄土塬区冬小麦能否利用3 m以下土壤水分缺乏直接证据,鉴于此,本文拟回答以下2个问题:(1)黄土塬区冬小麦生育过程中是否利用3 m深度以下土壤储水?何时利用?(2)不同深度土层土壤水,尤其是3 m深度以下土壤水对冬小麦耗水的贡献是多少?

稳定同位素技术为解决以上两个问题提供了可能。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^[7-8],因此植物木质部水同位素组成是其所利用水源同位素组成的综合体现。要定量研究植物对各水源的利用比例,可采用二源或三源线性混合模型^[9],但该模型不能用于确定多于3种以上水源的利用比例,而 IsoSource 多源混合模型^[10]可用于估算多种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与普及,已有学者开展了小麦水分溯源的试验研究。苑晶晶等^[11]利用 $\delta^{18}O$ 信息揭示了黄河下游引黄灌区不同灌溉条件下冬小麦对土壤水和地下水的利用比例;张丛志等^[12]研究表明封丘地区冬小麦对地下水以及不同深度土壤水的利用比例随着生育期的变化而变化。但是上述两项研究均在有灌溉条件且地下水埋深较浅的地区进行,杜俊杉等^[13]则选择了地下水埋深远大于地下水蒸发极限水位埋深的北京大兴地区,确定了0~2 m土层范围内不同深度土壤水对冬小麦耗水的贡献。安江龙等^[14]应用3 m塑料管土柱法在田间进行冬小麦种植试验,并应用同位素溯源发现冬小麦自灌浆期起开始明显利用2~3 m土层土壤水。程立平等^[15]初步研究了黄土塬区底墒充足条件下冬小麦拔节期和抽穗期的水分利用规律,但其结果仍需进一步验证。

旱作冬小麦对深层土壤水分的利用是土壤水库调蓄的重要体现,在黄土塬区土壤—植物—大气连续体水分运动与平衡中占据重要位置,是旱作农业研究的重要内容。本试验首先对3 m土层土壤水分人工标记氘水(D_2O),并通过测定小麦茎秆水 δD 明确冬小麦是否利用3 m深度土壤水分;其次通过测定小麦茎秆水、降水和不同土层土壤水 $\delta^{18}O$ 值,利用二源线性混合模型和 IsoSource 多源混合模型确定冬小麦对降水、不同土层土壤水的利用比例。本研究对于明确冬小麦水分利用规律,进一步推进旱作农田生态系统土壤水分循环研究具有重要理论意义和实际意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在中国科学院长武农业生态试验站(107°40' E, 35°14' N)进行。试验地点位于陕西省长武县所在的黄土塬上,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 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,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 样品采集与测定

试验于 2016 年 5—6 月进行。选择长势良好的小麦地 (品种为长旱 58),于 5 月 9 日在地块中央位置约 1 m^2 样方处,利用土钻于四角处钻至 3 m 深度,共注入氙水 50 mL 进行人工标记,然后回填。

1.2.1 土壤样品采集 分别于 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),在人工标记样方内使用土钻采集土壤样品,采样深度 4 m,间隔 20 cm 采样 1 次。因标记样方面积小,为减少扰动,每次仅取 1 个土壤剖面。土壤样品分为 2 份,1 份密封保存带回实验室利用低温真空抽提系统 Li-2000 抽提土壤水样;1 份装入铝盒利用烘干法测定土壤含水量。将抽提的土壤水样密封于水样瓶中,编号、记录并冷藏待测。

1.2.2 小麦茎秆水样采集 分别于 2016 年 5 月 9 日、5 月 13 日、5 月 19 日、5 月 24 日、5 月 29 日、6 月 4 日和 6 月 10 日,围绕人工标记样方采集冬小麦样品。采集方法为随机选择 2~3 株长势良好冬小麦,连根拔起采集近根部的茎秆,剔除叶鞘部分,快速装入 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。将抽提的植物水样密封于水样瓶中,编号、记录并冷藏待测。

1.2.3 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。

1.2.4 氢氧稳定同位素测定 小麦水样 δD 值测定:采用 LGR IWA-45EP 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 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

所有水样测定结果以标准平均海水 (SMOW) 为标准的千分偏差表示。

$$\delta\text{D}(\text{或}\delta^{18}\text{O}) = \left[\frac{(R_{\text{sa}} - R_{\text{st}})}{R_{\text{st}}} \right] \times 1000\text{‰}$$
式中, R_{sa} 和 R_{st} 分别表示样品和标准物中稳定性氢同位素 D/H 或稳定性氧同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率, δ 值越小表明重同位素越贫化, δ 值越大表明重同位素越富集。

1.3 数据统计与分析

利用二源线性混合模型和 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 0.1%。

采用 Excel 2007 软件进行数据处理与制图,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 土壤水分剖面动态变化

由图 1 可见,从抽穗期至乳熟期,小麦样地 0~4 m 土壤水分剖面随发育时间的推进而向左移动,土壤水分含量逐渐减少,其中 1~2 m 土层内土壤含水率减幅较大,而 0~1 m 土层范围内减幅较小,尤其是 0.5 m 以上土层范围内几乎无变化。推测原因有以下 3 点:一是 0.5 m 以上土层内土壤含水率与萎蔫系数持平,可以认为该层范围内土壤水已不能为冬小麦所利用,冬小麦只能利用 0.5 m 以下土壤水;二是土壤水分含量低于毛管断裂含水量 ($15\%^{[16]}$),土壤蒸发微弱;三是研究时段内降水较少,5 月 1 日—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 d (图 2),最大降水量仅为 13.6 mm,很难入渗至 20 cm 深度土层,而本试验则是从 20 cm 深度起测定土壤水分。

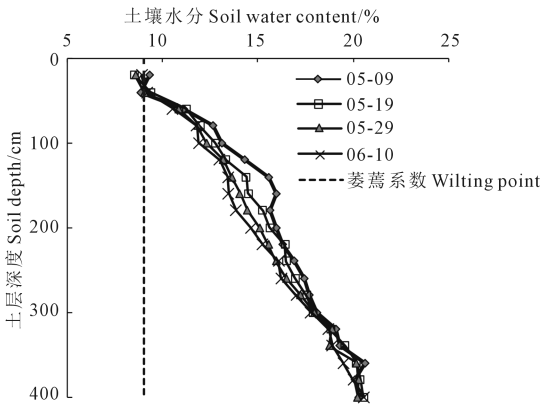


图 1 冬小麦样地土壤水分剖面动态变化
Fig.1 Dynamics of soil water profiles under winter wheat plot

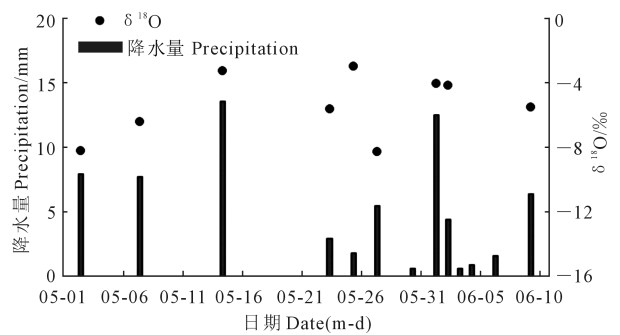


图 2 研究时段内降水量及降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig.2 Precipitation and its $\delta^{18}\text{O}$ values during study period

表 1 不同采样日期冬小麦茎秆水样 δD 值/ ‰

Table 1 δD values of winter wheat stem water samples in different dates

重复样品 Duplicate sample	05-09	05-13	05-19	05-24	05-29	06-04	06-10
1	-66.83	-55.35	-61.31	150.87	-39.69	-41.20	-
2	-59.79	-61.31	-62.87	-54.52	-	-34.17	-47.50
3	-64.40	-59.30	-57.19	-60.55	-38.28	-33.77	588.56

注: -表示水样中氢同位素太富集未能测出。

Note: - means that hydrogen isotope in water sample was too rich to be determined.

分水,从而导致茎秆水 δD 值变大。可见冬小麦从 5 月 24 日起开始利用 3 m 深度以下土壤水分,其所占比例则需进一步研究。

2.3 不同来源水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化

黄土塬区地下水埋藏极深而不参与土壤-植被系统水分循环,因而冬小麦能够利用的水源只有降水和土壤水。受蒸发效应影响,浅层土壤水分重同位素富集^[18]。由图 3 可见,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 20 cm 处最大,20~280 cm 深度范围内土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度增加而逐渐减小,280 cm 土层以下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度增加而逐渐增加;4 个时期土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为-12.17‰、-12.03‰、-12.49‰和-12.70‰,方差分析表明 4 个时期之间并无显著差异。蒸发和降水入渗混合作用是引起土壤水同位素值变化的主要原因^[19],结合 2.1 部分可知研究时段内土壤蒸发微弱,降水量小难以入渗至 20 cm 深度处,因而土壤水同位素值无显著时间变化。

研究时段降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 2)与多年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值-10.38‰^[20]相比明显偏大,原因在于长武黄土塬区降水同位素组成具有冬春富集、夏秋贫化的季节变化特征^[19-20]。降水只有转化为土壤水才能被植物利用,研究时段属于旱季,降水量小且很难入渗至 20 cm 深度,降水转化的土壤水集中在 0~20 cm 深度范围以内,而小麦根系密度在这个深度范围以内最大,能够直接利用降水转化而来的土壤水。本研究中土壤水同位素采样是从 20 cm 开始的,故

2.2 冬小麦茎秆水样 δD 值变化

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人工标记的土壤水分提供有效信息。5 月 9 日、5 月 13 日和 5 月 19 日冬小麦茎秆水 δD 平均值分别为-63.67‰、-58.66‰和-60.46‰,无明显变化;但是从 5 月 24 日起冬小麦茎秆水 δD 值明显变大(表 1)。 δD 值变化表明 5 月 19 日之前,冬小麦并未利用标记在 3 m 深度处的氘水,但是从 5 月 24 日起冬小麦已经能够利用这部

将降水作为一个独立水源。已有研究表明干旱地区植物体在降水之后的 7 d 内仍保存有大量的降水^[21],因此本文分别利用 5 月 7 日、5 月 14 日、5 月 27 日和 6 月 9 日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值来计算抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期降水对冬小麦耗水的贡献率,这 4 日降水量分别为 7.7、13.6、5.5 mm 和 6.4 mm(图 2),降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为-6.03‰、4.72‰、6.57‰和 5.67‰(图 3)。

植物根系吸收水分过程一般并不发生同位素分馏现象^[7-8],因此小麦茎秆水的同位素组成是其所利用水源同位素组成的综合反应。由图 3 可见,4 个生育期小麦茎秆水同位素组成均介于降水和土壤水同位素组成之间,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为-9.16‰、-9.82‰、-10.37‰和-10.02‰。

2.4 降水和土壤水对冬小麦耗水贡献率的模型预测

研究时段内样地 0.5 m 土层以上土壤含水率低于或与萎蔫系数持平,因而冬小麦仅能吸收该深度以下土壤水分;由冬小麦茎秆水样 δD 值变化可知,冬小麦在 5 月 9 日和 5 月 19 日并未利用 3 m 深度土壤水分,在 5 月 29 日和 6 月 10 日则利用了 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 4 组,分别是 50~100、100~150、150~200 cm 和 200~300 cm;在灌浆期和乳熟期将 50~400 cm 土层分为 5 组,分别是 50~100、100~150、150~200、200~300 cm 和 300~400 cm;然后将冬小麦不同生

育期茎秆水、降水以及各组土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别输入 IsoSource 模型,计算各水源对冬小麦耗水的贡献率。

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概率分布范围,但是也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 给出了不同生育期降水和各组土壤水分对冬小麦耗水的平均贡献率,其中误差线代表了各组水源相对贡献率的分布范围。

从图 4 看出,无论是降水还是不同土层土壤水

对冬小麦耗水贡献率,IsoSource 模型结果分布范围都较宽,从而给确定不同水源的贡献率带来一定的不确定性。为了减小这种不确定性,本文利用二源混合模型计算降水和土壤水对冬小麦耗水的贡献率,结果如表 2 所示。二源模型计算结果为唯一解,但是其土壤水贡献率为总贡献率,不能得出分层土壤水的贡献率,因此本文利用二源模型结果对 IsoSource 模型结果进行校对,以确定不同深度土层土壤水对冬小麦耗水的贡献率。

对比 2 种模型所得降水贡献率可知,4 个生育期二源模型结果均分布于 IsoSource 模型结果的分

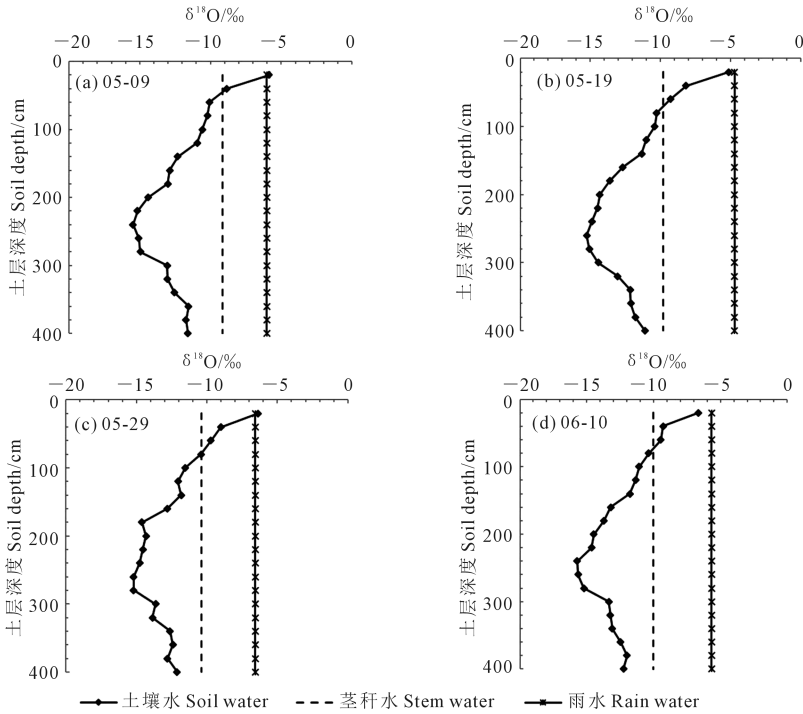
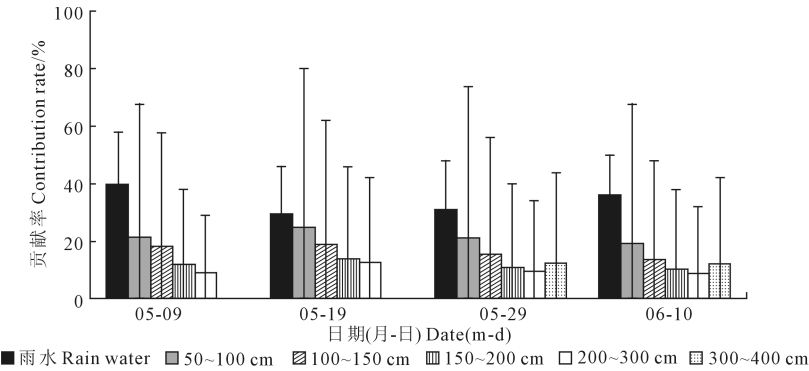


图 3 不同生育期冬小麦茎秆水、土壤水和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig.3 $\delta^{18}\text{O}$ values of winter wheat stem water, soil water, and rainwater at different growing stages



注:柱高度代表平均贡献率,误差线代表贡献率分布范围。

Note: Column height represents the mean value of contribution rate and bar represent the range of contribution rate.

图 4 不同生育期降水和各层土壤水对冬小麦耗水的贡献率

Fig.4 Contribution rates of rainwater and soil water in different soil layers to winter wheat water consumption at different growing stages

布范围之内(图 4,表 2),表明两者数据相符,所得结果可信。但是与多源模型唯一解形式(平均贡献率)相比,二源模型计算所得降水贡献率偏高,土壤水贡献率偏低,4 个生育期差值分别为 9.6%、0.5%、4.8%和 2.1%。据此对 IsoSource 模型计算所得的不同土层土壤水平均贡献率进行校对,具体方法为以平均贡献率的大小为权重,对差值进行分配,结果见表 3。

表 2 各生育期雨水和土壤水对冬小麦耗水的贡献率/%

Table 2 Contribution rate of rain water and total soil water to winter wheat water consumption in different growth stages

水分来源 Moisture source	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk-ripening stage
雨水 Rain water	49.2	30.2	35.9	38.2
土壤水 Soil water	50.8	69.8	64.1	61.8

表 3 各生育期不同土层土壤水对冬小麦耗水的贡献率/%

Table 3 Contribution rate of soil water stored in different soil layers to winter wheat water consumption in different growth stages

土层深度 Soil depth/cm	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk-ripening stage
50~100	17.9	24.6	19.5	18.6
100~150	15.2	18.8	14.4	13.2
150~200	10.0	14.0	10.0	10.3
200~300	7.7	12.4	8.7	8.3
300~400	0.0	0.0	11.4	11.5

综上可得从抽穗期至乳熟期,降水对冬小麦耗水的贡献率在 30.2%~49.2%之间,平均值为38.4%,贡献率大小取决于小麦采样日期距离上次降水日期的远近以及降水量的大小^[21]。而土壤水对冬小麦耗水的贡献率总体上表现为随土层深度增加而减小,50~100 cm 土层土壤水平均贡献率为20.2%;100~150 cm 土层土壤水贡平均献率为 15.4%;150~200 cm 土层土壤水平均贡献率为 11.1%;200~300 cm 土层范围土壤水平均贡献率为 9.3%。冬小麦自灌浆期起开始利用 3 m 深度以下土壤水,5 月 29 日和 6 月 10 日利用量分别占其总耗水量的 11.4%和 11.5%。

3 讨 论

3.1 冬小麦根系吸水率剖面变化特征

冬小麦根系吸水率在土壤剖面上的分布状况是由土壤含水量的垂直分布和根密度分布状况所决定的^[22]。相关试验表明研究区冬小麦返青期根系已生长至 250 cm 深度,至收获期小麦根系最深可达到 320 cm^[1],但是冬小麦根长密度具有随土壤深度增加而减小的变化特征,即深层剖面根系分布较少。研究区冬小麦拔节期前土壤水分含量较高且

剖面分布均匀^[23],在这种条件下根系吸水率的分布与根密度的分布规律相同,吸水率随着深度的增加而降低,吸水率大的地方土壤水分消耗较多^[22],随着时间的延长,土壤含水量逐渐减少,根系吸水速率随之降低^[24],高吸水区逐渐向下转移^[22],同位素试验也证明了这种现象的存在^[15]。根系吸水与土壤物理蒸发效果叠加,使浅层土壤水分迅速减少,图 1 表明黄土塬区抽穗期 50 cm 以上土层含水量已低至萎蔫系数。抽穗期和开花期 1~2 m 土层范围土壤水对小麦耗水贡献率分别为土壤水总贡献率的25.2%和 32.8%,表明小麦高吸水区已转移至 1~2 m 土层范围;灌浆期和乳熟期 1~2 m 土层范围土壤水对小麦耗水贡献率有所降低,分别为 24.4%和 23.5%,其原因在于冬小麦已开始利用 3 m 深度以下土壤水,高吸水区依然在向下移动。图 1 可见,3 m 深度以下土壤含水量丰富,但是冬小麦自灌浆期才开始利用该层土壤水分,占其耗水量的 11.4%,原因在于冬小麦对某一层次土壤水分的利用不仅与土壤水分状况有关,还与该层中根量大小有关。Barraclough 等^[25]指出土壤中具备吸水能力的根量阈值为 1 cm·cm⁻³,低于此值,即使土壤含水量较高,也难以被充分利用。说明冬小麦根系可能在灌浆期前已扎至 3 m 深度以下,但是灌浆期以后 3 m 以下深度小麦根量才达到吸水阈值,从而开始有效利用 3 m 深度以下的土壤水分。

3.2 冬小麦土壤水分利用与土壤干层

黄土塬区高产农田下普遍存在着土壤干层现象^[6,26],土壤湿度低于田间稳定湿度时(毛管断裂含水量,15%)即认为形成土壤干层^[16],是该区土壤水分负平衡所导致的一种土壤水文现象。土壤干层位于降水入渗深度以下土体某一范围以内,具有一定的时间和空间稳定性,干燥化程度因植物种类和生长年限而定。研究表明农田下土壤干层分布深度一般为 1~3 m^[27],本研究中冬小麦生育中后期主要吸水层为 1~2 m 土层范围,其在 2 m 以上土层含水量均低于田间稳定湿度,可以推断若冬小麦主要吸水层下移至 2~3 m 土层,则其含水量极有可能低于稳定湿度,具备了形成土壤干层的条件。但是冬小麦主要吸水层下移深度取决于土壤底墒以及生育期降水量,若底墒充足或者降水量丰富,则浅层土壤含水量减少速度缓慢,高吸水区向下转移深度少^[22, 24],否则转移深度大。土壤干燥化是冬小麦对土壤水分利用率高高低的一个标志,干燥化土层厚度愈大,干燥化程度愈剧烈,说明冬小麦对土壤水分利用愈充分,土壤水库调蓄作用愈大。但是,若

干层水分不能得到充分恢复,便会削弱土壤水库的供水调节能力,影响土壤水库调蓄功能的持续发挥^[6]。频率分析表明,长武高产农田条件下,年降水入渗至 2 m 和 3 m 深度分别需要 3 a 和 10 a 才能重现 1 次^[28],表明高产农田即使经过夏闲期降水补充,其深层土壤水分也未必能够恢复,从而形成土壤干层,降低土壤水库调节供水的能力。因此在生产实践中,可通过夏闲期蓄水保水等田间措施,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,以此保证土壤水库调蓄功能的持续发挥。

3.3 农田水量平衡计算中深度的选择

黄土高原地区土壤水量平衡计算土层深度至关重要,深度选择不当会使植物与水分关系研究的结论失真^[5, 23]。以往在利用水量平衡法计算农田蒸散量时多以 2 m 或者 3 m 为计算深度^[6, 26],研究表明从灌浆期起冬小麦对 3 m 深度以下土壤水分利用量占其总耗水量的 11.4%,因此建议在农田水量平衡计算中采用 4 m 深度为宜,这也与长期定位监测农田深剖面水分数据计算所得结论相符^[23]。

4 结 论

稳定同位素试验表明,在长武黄土塬区,从抽穗期至乳熟期降水对冬小麦耗水的平均贡献率为 38.4%,土壤水的平均贡献率为 61.6%。分土层来看,从抽穗期至乳熟期,50~100 cm 土层土壤水对冬小麦耗水的平均贡献率为 20.2%,100~150 cm 土层为 15.4%,150~200 cm 土层为 11.1%,200~300 cm 土层为 9.3%。随着生育期的推进,冬小麦主要吸水层逐渐向下延伸,吸水深度不断增加;冬小麦茎秆水 δD 值变化表明,冬小麦自灌浆期开始利用 3 m 以下土壤水分,300~400 cm 土层土壤水对灌浆期至乳熟期冬小麦耗水的平均贡献率为 11.4%。可见,黄土塬区深层土壤储水对于旱作冬小麦高产稳产具有重要意义。生产实践中,应通过夏闲期蓄水保水措施,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,以此保证土壤水库调蓄功能的持续发挥。

参 考 文 献:

[1] 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.
[2] 李玉山. 土壤水库的功能和作用[J]. 水土保持通报, 1983, 3(5): 27-30.
[3] 孟晓瑜,王朝辉,李富琴,等. 底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 369-375.
[4] 邓振镛,张强,王强. 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.
[5] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报,

2002, 39(3): 404-411.
[6] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
[7] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33:507-559.
[8] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [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 $\delta^{18}O$ 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 MixSIAR 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] 程立平,刘文兆. 黄土塬区不同土层土壤水分对旱作冬小麦耗水的贡献[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2285-2291.
[16] 杨文治,田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
[17] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^2H/^1H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry: RCM, 2011, 25(21):3360-3368.
[18] Allison G B, Barnes C J, Hughes M W. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soil 2. experimental [J]. Journal of Hydrology, 1983, 64(1-4):377-397.
[19] 程立平,刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 651-658.
[20] 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.
[21] 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 northwestern China [J]. Plant Ecology, 2006, 184(1): 1-12.
[22] 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.
[23] 程立平,刘文兆,李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1975-1983.
[24] 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.
[25] Barraclough P B, Weir A H. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat [J]. Journal of Agricultural Science, 1988, 110(2):207-216.
[26] 黄明斌,党廷辉,李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.
[27] Cheng L P, Liu W Z, Li Z, et al. Study of soil water movement and groundwater recharge for the loess tableland using environmental tracers [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1):23-30.
[28] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8):1133-1138.