

黄土高原旱作麦田深层土壤水利用 与小麦产量及产量稳定性的关系

杨文稼^{1,2}, 肖庆红³, 王仕稳^{2,4}, 韦伟³, 殷俐娜^{2,4}, 邓西平^{2,4}

(1.农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建)/长江大学农学院,湖北荆州434025;

2.西北农林科技大学水土保持研究所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;

3.宁夏回族自治区农业农村厅农业综合开发中心,宁夏银川750000;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

摘要:黄土高原是我国重要旱作农业区,冬小麦是该地区重要的粮食作物之一,如何进一步提高旱作小麦产量并降低由干旱缺水引起的产量波动是该区域未来小麦生产亟待解决的重要问题。由于黄土高原地区冬小麦生育期和降水季节不匹配,土壤水的利用对该区域小麦生产至关重要。基于黄土高原地区以往研究数据,分析表明当前冬小麦产量水平下土壤水利用并不充分;进一步分析表明,1~2 m 深层土壤水残留量和产量高度相关,即在冬小麦收获期,当1~2 m 深层土壤中有效水残留量为100~130 mm 时,冬小麦产量为2 640~4 920 kg·hm⁻²,而当残留量减少至30~70 mm 时,其产量可显著提高至5 250~6 576 kg·hm⁻²;此外,加强深层土壤水利用亦可显著提高高产概率。统计结果表明,在可用水量为666~766 mm(播前0~2 m 土层储水量与生育期降水量之和)条件下,收获时如果1~2 m 深层土壤水残留量从270~210 mm 降低至150~90 mm 时,小麦产量高于4 000 kg·hm⁻²和5 000 kg·hm⁻²的概率可分别从6%提高至92%、1%提高至66%;在可用水量大于766 mm 条件下,小麦产量高于5 000 kg·hm⁻²和6 000 kg·hm⁻²的概率可分别从14%提高至99%、1%提高至41%。进一步讨论了如何通过品种和农艺措施的选用来提高小麦对深层土壤水的利用,基于实际研究案例印证了在该区域可通过优化农艺措施增加深层水利用从而提高产量和水分利用效率的可行性。

关键词:冬小麦;深层土壤水;产量稳定性;水分利用效率;旱作农业;黄土高原

中图分类号:S512;S152.7 **文献标志码:**A

Relationship between water use of subsoil and wheat yield and yield stability in dryland wheat on the Loess Plateau

YANG Wenjia^{1,2}, XIAO Qinghong³, WANG Shiwen^{2,4}, WEI Wei³, YIN Lina^{2,4}, DENG Xiping^{2,4}

(1. MARA Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River (Co-construction by Ministry and Province), College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Agricultural Comprehensive Development Center of the Department of Agriculture and Rural Affairs of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750000, China;

4. Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The Loess Plateau of China is a typical dryland area and winter wheat is one of the major cereal crops on the Loess Plateau. How to further increase wheat yield as well as maintain the yield stability is a crucial issue that needs to be addressed urgently in this region. Wheat production is profoundly affected by the utilization of soil water due to the region's erratic precipitation and the mismatch between the rainy season and the winter wheat growing season. We collected the data from published studies on the Loess Plateau and found that large amounts of available soil water remain in soil layer at harvest time. We further analyzed the relationship between grain yield of

winter wheat and soil water utilization. The results showed that at wheat harvest time, grain yield was 2 640~4 920 kg · hm⁻² when the residual subsoil water storage (RSWS) was 100~130 mm, and it was increased to 5 250~6 576 kg · hm⁻² when the RSWS was 30~70 mm. Furthermore, the probability of high grain yield was enhanced by increasing the utilization of subsoil water. When the RSWS reduced from (270~210 mm) to (150~90 mm) mm, the probability of yield exceeding 4 000 kg · hm⁻² or 5 000 kg · hm⁻² was increased from 6% to 92% or 1% to 66%, respectively, under 666~766 mm WS (water supply during the growing season and the sum of soil water storage in 0~200 cm and growing season precipitation) condition. The probability of yield exceeding 5 000 kg · hm⁻² or 6 000 kg · hm⁻² was increased from 14% to 99% or 1% to 41%, respectively under >766 mm WS condition. In addition, we discussed how to increasing subsoil water utilization by variety and agronomic practices and exemplified the feasibility of enhancing yield and water use efficiency by increasing subsoil water utilization through the improvement of agronomic practices.

Keywords: winter wheat; subsoil water utilization; yield stability; water use efficiency; dryland agriculture; Loess Plateau

旱地占据了地球 41% 的陆地面积并养育了 35% 的世界人口。雨养旱作农业是旱地主要的农业种植体系,天然降水是雨养旱地作物生产唯一的水源,其种植面积可占全球耕地面积的 2/3^[1],由此看出旱作作物产量对全球粮食安全至关重要。黄土高原是我国主要的旱作农业区域之一,横跨陕、甘、晋、宁、蒙、青等六省(区),耕地面积约为 1 600 万 hm²。旱作冬小麦是黄土高原重要的粮食作物,种植面积 430 万 hm²,约占总耕地面积 44%^[2-3]。由于年均降水量低,且降雨和生育期在时间上错配,黄土高原地区冬小麦生产极易受旱,产量普遍偏低;此外,年际间高的降水波动致使冬小麦产量在水分条件不同的年份间差异较大且产量稳定性较低。近年来受全球气候变暖的影响,极端天气发生概率持续升高,这将进一步增加作物受旱频率。据当前研究预测,全球气候变暖会导致本世纪末小麦种植区面临严重缺水的比例从当前的 15% 提高到 60%^[4]。因此,面对不断变化的气候环境和日益增长的粮食需求,如何进一步实现旱地小麦的高产和稳产是黄土高原旱作农业可持续发展中必须解决的问题。

黄土高原冬小麦产量水平取决于生育期内的降水量和播种时土壤中的储水量。由于生育期内降水量很难满足冬小麦水分需求,播种时的土壤储水则成为冬小麦生产的关键水源。前人研究表明,播种时土壤储水可在丰水年为冬小麦提供 25%~40% 的所需水分,在干旱年这一比例甚至可提升至 60%~80%^[5]。黄土高原土层深厚且土壤田间持水量较高,其 2 m 土层内可容纳约 600 mm 降水,3 m 土层内可容纳约 800 mm 降水,这意味着该地区土壤是一个巨大的天然“水库”^[6]。在不考虑径流的

情况下,一年中绝大部分降水,包括 7—9 月冬小麦休闲期内的降水均能够较好地储存在土壤中。因此,若能充分利用黄土高原土壤这一特征,就可以有效缓解降水在年际和季节间分配不均,实现水分的时空调控,实现黄土高原旱作小麦的高产稳产。综上,在黄土高原,土壤水库是联结降水和作物用水的枢纽,如何实现对土壤水的有效利用是进一步实现冬小麦高产稳产的关键。

1 黄土高原麦田土壤水库动态变化特征

明确冬小麦能够利用的土壤储水深度及其变化特征是有效利用土壤水的基础。在不考虑水分纵向运输的情况下,作物根系深度决定其能够利用的土壤水深度。多个研究已证实,黄土高原地区冬小麦根系在土壤中分布可达 3 m 左右,因此 3 m 以内的土壤储水可视为冬小麦的土壤水库^[7-8]。受降水以及冬小麦各生育期内根系分布特征(深度、密度)的影响,麦田土壤水库在全年不同季节呈现出规律性的变化特征。黄土高原 7—9 月的休闲期降水量可占全年降水量的 50%~60%,而冬小麦生育期为每年的 10 月至翌年 6 月。因此,土壤储水量通常在冬小麦播种时最高。据统计,受当年降水影响,3 m 土层储水最低为 420 mm 左右,最高可达约 800 mm。在生育前期,绝大部分冬小麦根系分布在浅层土壤中,因此拔节期之前小麦主要消耗 1 m 以上土壤储水,且由于叶面积指数较低,相当一部分浅层储水通过土壤蒸发而损失;而 1 m 以下土壤储水在生育前期消耗量相对较低,并随着土壤深度的增加消耗量逐渐递减。此外,研究表明部分农田拔节期之前土壤储水存在补充现象,一般 1 m 以下储

水补充量更高^[5]。

对黄土高原地区发表研究进行统计表明,0~1、1~2、2~3 m 土层土壤储水消耗范围在播种至返青期分别为-18~69、-70~46、-76~16 mm,在返青期至拔节期分别为-9~59、-31~40、-30~12 mm(负值代表储水量增加)(图1)。在拔节期之后(拔节期~开花期、开花期~收获期),为了维持自身旺盛的营养生长及生殖生长,冬小麦会加大对土壤储水的吸收。如果后期降水量较多,土壤储水仍存在补充现象,且1 m 以上土壤储水补充量相对较多。统计表明(图1),从拔节期至开花期,0~1、1~2、2~3 m 土壤水消耗范围分别为-20~79、-17~70、-6~62 mm;从开花期至收获期,消耗范围分别为-58~75、-9~73、3~53 mm。进一步分析表明,如果土壤储水可以被补充,拔节期之前1 m 以下土层补充量相对较高,而拔节期之后1 m 土层以上补充量较高;如果土壤储水被消耗,1 m 以上土壤储水消耗量在全生育期均处于较高水平,而1 m 以下土壤储水消耗量在拔节期之前较低但在拔节期之后显著提高。

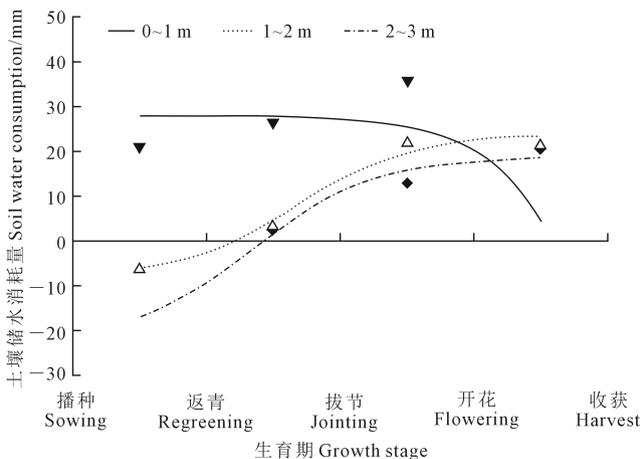


图1 黄土高原麦田不同土层储水在各生育期内的平均消耗量($n=1066$)
(根据黄土高原已经发表数据统计)

Fig.1 Soil water consumption in different soil depths during growth stages in wheat farmland on the Loess Plateau ($n=1066$)
(From the published statistics of the Loess Plateau)

2 黄土高原麦田深层土壤水利用与小麦产量的关系

能够被作物吸收利用的水分总量决定了作物的产量潜力,而这部分水分能否被作物有效利用则决定了产量实际的高低。凋萎系数(-1.5 MPa)以下的土壤含水量称为无效土壤水,这部分土壤水无法被植物吸收利用。黄土高原主要为黄土性土壤

(Calcic Kastanozems, FAO),其凋萎系数为7.3%~8.6%(w/w),即每1 m 深土壤中约有90~110 mm 的储水无法被作物吸收利用^[9-10]。黄土高原麦田在收获期土壤残留水随着产量不同有所差别,一般表现为产量越高则残留越少,并且浅层残留少而深层残留多。统计表明,麦田收获期0~1 m 土层土壤储水残留量一般在98~151 mm 之间,1~2 m 土层在132~193 mm 之间,2~3 m 土层在152~230 mm 之间。即使扣除100 mm 的无效水,1~3 m 土层中还残留有效水84~220 mm,该土层中较高的储水残留量说明了该部分储水并未在冬小麦生育后期得到有效利用。

深层土壤水(以下简称深层水)指60~100 cm 土层以下的储水^[11],而具体“深层”则需要根据作物根系分布特征进行定义。在黄土高原,冬小麦在1 m 以下土壤中根系分布密度较低并且根深一般可达3 m,因此,1~3 m 土层中的储水可被定义为能被冬小麦吸收利用的深层水^[11]。冬小麦对水分的大量需求主要发生在拔节后,籽粒灌浆期则更为敏感,籽粒灌浆期水分供应不足会造成大幅减产。如果能将黄土高原麦田中残留的深层水在生育后期进一步充分利用就能在一定程度上满足冬小麦后期水分需求,提高水分利用效率,最终实现增产。因此,深层水的利用和产量密切相关,也就是说收获期深层水的残留量和产量密切相关。我们对已发表文献数据进行统计表明,在冬小麦收获期,当1~2 m 深层土壤中有效水残留量为100~130 mm 时,冬小麦产量为2 640~4 920 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而当残留量减少至30~70 mm 时,其产量可显著提高至5 250~6 576 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[12-14]。通过对黄土高原涉及土壤水与冬小麦产量的48篇文献中的2 431个观察值进行统计分析,表明在不同的水分条件下(播前土壤储水+生育期降水),冬小麦产量均随着深层水残留量的减少而逐渐提高(图2)^[15]。

3 黄土高原麦田深层土壤水利用和高产概率的关系

旱地水分条件在不同季节或不同年份差异较大,从而限制旱作作物产量并降低产量稳定性。在黄土高原,不同年份间高的降水波动会极大地影响小麦在不同年份下生长的水分条件,由此造成冬小麦在干旱年减产严重而在丰水年产量较高,产量波动性较大。因此,考虑到降水波动导致作物产量在不同年份间发生大幅波动,提高高产概率和增产同等重要。也就是说,在水分较好的年份使产量最大

化,在水分不好的年份减少产量降低的幅度。通过统计分析黄土高原地区麦田收获期深层水残留量与冬小麦产量概率的关系,表明在不同的水分条件下,降低麦田收获期 1~2 m 深层水残留量,即进一步利用深层水可显著提高黄土高原地区冬小麦高产

$$Z=2780+1.65X-18.32Y+0.002X^2-0.12Y^2+0.05XY$$

$$(R^2=0.56, n=321)$$

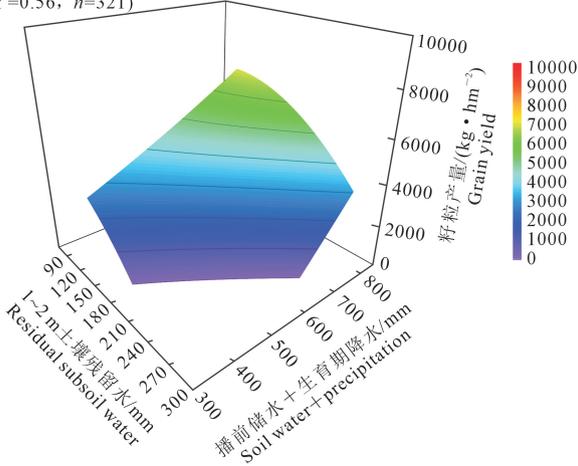


图 2 当季供水条件(播前土壤储水量与生育期降水量之和)(X轴)和收获期深层水残留量(Y轴)对冬小麦产量(Z轴)的影响

Fig.2 Response of wheat yield (Z-axis) to water condition (soil water at sowing plus growing season precipitation, X-axis) and residual subsoil water at harvest (Y-axis)

概率(图 3)^[15]。当 1~2 m 深层水残留量从 270~210 mm 降低至 150~90 mm 时(深层水利用量增加),在 466~566 mm 水分条件下小麦产量高于 3 000 kg·hm⁻² 的概率从 0% 提高至 46%;在 566~666 mm 水分条件下小麦产量高于 3 000 kg·hm⁻² 和 4 000 kg·hm⁻² 的概率分别从 1% 提高至 82%、0% 提高至 52%;在 666~766 mm 水分条件下小麦产量高于 4 000 kg·hm⁻² 和 5 000 kg·hm⁻² 的概率分别从 6% 提高至 92%、1% 提高至 66%;在 >766 mm 水分条件下小麦产量高于 5 000 kg·hm⁻² 和 6 000 kg·hm⁻² 的概率分别从 14% 提高至 99%、1% 提高至 41%。

4 黄土高原麦田深层土壤水分利用与水分利用效率

旱作农业增加作物产量的关键在于提高水分利用效率。Zhang 等^[16]统计了黄土高原已发表的 35 篇文献中的数据,得出冬小麦平均水分利用效率仅为 12.1 kg·mm⁻¹·hm⁻²。Jin 等^[17]调查了黄土高原 158 个县(市)的冬小麦生长状况,指出该地区冬小麦水分利用效率多分布在 6~14 kg·mm⁻¹·hm⁻² 的范围内。因此,黄土高原地区冬小麦水分利用效率仍有较大的提高潜力。

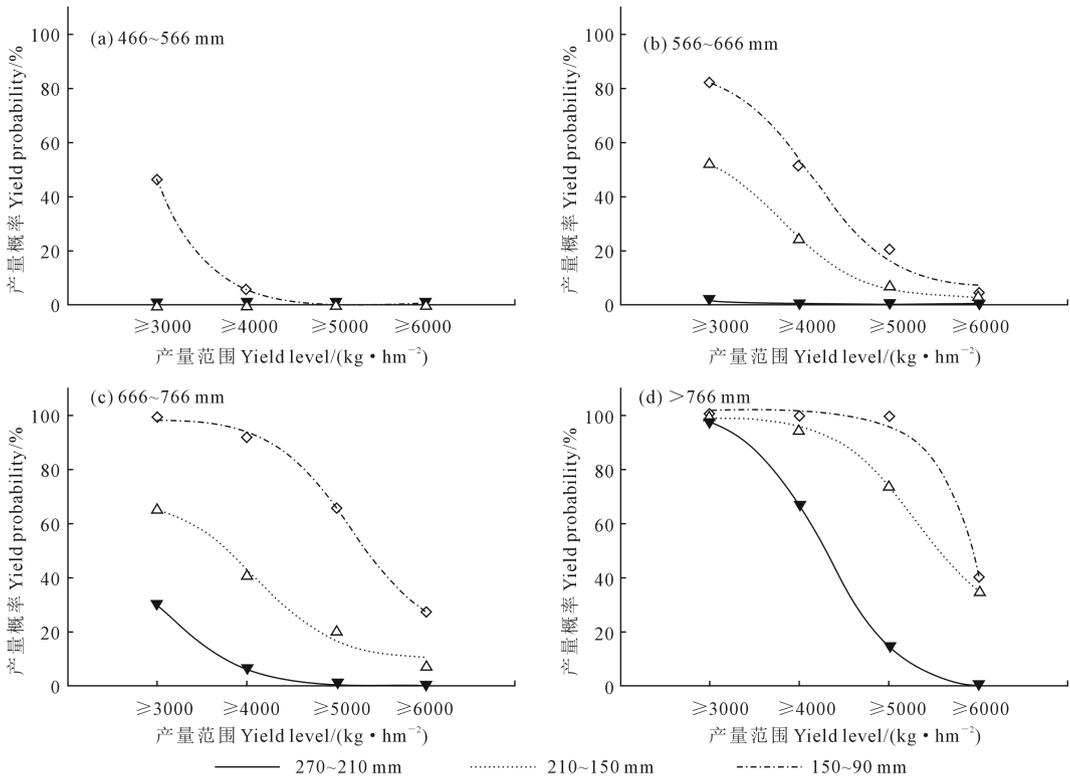


图 3 收获期 1~2 m 深层水残留量对冬小麦产量高于某一水平以上的概率(%)的影响($n=337$)

Fig. 3 Effects of residual subsoil water at depth of 1~2 m at harvest on the probability (%) of wheat yield exceed a certain level ($n=337$)

旱地提高作物水分利用效率的主要途径是将储存在农田中的水分尽可能多地被作物吸收利用,并减少蒸发损失。黄土高原土壤储水受高温和饱和蒸汽压差的影响,有一大部分会通过土壤蒸发而损失,但这种蒸发对深层水的影响较小,只会造成5%~10%的损失^[11]。此外,深层土壤水可直接被作物根系所吸收,因此其主要消耗途径是作物蒸腾。较多研究表明深层水通常只会在生育后期被冬小麦吸收利用,而这一时期增加水分供应可以极大地提高水分利用效率^[18-20]。国外其它旱区有关深层水的研究证实了每增加10 mm的深层水消耗量可多生产330~590 kg·hm⁻²的籽粒产量,其边际水分利用效率达到了33~59 kg·mm⁻¹·hm⁻²,甚至部分小麦品种的边际水分利用效率高达73 kg·mm⁻¹·hm⁻²^[21-23]。在黄土高原,对前人研究结果进行统计,当麦田收获期1~2m深层土壤中有效水残留量为100~130 mm时,水分利用效率仅为9.3~13.8 kg·mm⁻¹·hm⁻²;而当残留量降低至30~70 mm时,冬小麦水分利用效率可提高至14.9~20.1 kg·mm⁻¹·hm⁻²^[12-14]。

5 提高黄土高原深层土壤水利用途径

根系分布范围和密度决定根系吸收水分的范围和强度。小麦属深根系作物,生育后期根系可伸长至3~5 m土层,但实际到达深度会受土壤结构的显著影响。如在重粘土中,小麦根系深度最多至0.8 m深土层,而在疏松的黄土性土壤中,小麦根系最深可达5 m^[7-8]。前人研究已证实了根系密度与根系吸水能力之间存在密切关系。高根系密度意味着更大的根-土交界面,即作物能从土壤中吸取更多的水分^[24],当小麦根长密度低于0.8 cm·cm⁻³时,根系成为土壤水分吸收的限制性因素,而在多数黄土高原麦田中,1 m土层以下的小麦根长密度均显著低于该值,大致为0~0.5 cm·cm⁻³^[5]。程立平等^[25]通过测定同位素研究了黄土高原不同深度土壤水分对冬小麦耗水的贡献,深层根系较少时1 m以下深层水对耗水的贡献率在拔节期和抽穗期仅为7.9%和13.5%。因此,增加深层土壤中的根系分布密度是提高黄土高原旱作麦田深层水的利用的关键。

根系在土壤中的生长分布除受品种决定外,还受土壤理化性质、土壤水分状况以及施肥和耕作方式等多种因素的影响。品种决定根系生长阈值,在同等环境条件下,不同品种间小麦根系生长速率、最大根深、根系在不同土层中的分配比例、总根长、

总根重、木质部导管直径、最大根冠比等一系列性状均存在较大差异。由于根系具有极强的可塑性,在不同的播种密度及生长环境下同一品种小麦根系性状也会发生不同程度的响应,从而影响其分布特征。根据根系的这些特性,前人在黄土高原开展了多项研究以探究如何进一步提高小麦深层根系分布密度。

Fang等^[12]在黄土高原长武地区的品种试验表明,相同环境下更换深根系品种后小麦深层根系生物量及分布比例显著提高70%~99%。因此,选用深根系品种是提高黄土高原地区冬小麦深层根系密度的先决条件。适度增密能够加强小麦个体间对养分及水分的种内竞争,从而使得根系横向分布收缩、纵向分布加深,提高深层根系分布密度。燕晓娟等^[26]在黄土高原地区的密度试验表明,适度增加播量能够显著提高冬小麦在1 m土层以下的根长密度。根系大小和分布也受土壤养分浓度的调控,因此,施肥尤其是氮肥能够极大地影响小麦根系生长。Wang等^[27]研究表明,在黄土高原地区施用适量的氮肥可以有效改善冬小麦根系生长,从而提高80 cm土层以下的根长密度;分期施氮(减少基肥投入量并在生育后期追施氮肥)能够在早期诱发根系的“觅食行为”,迫使根系为了寻求更多的养分扎入更深层土壤,有利于增加深层根系分布密度;同时,追肥也能在生育后期适时满足小麦生长发育所需养分,保障根系在深层土壤中的分布比例。

根系生长和伸长同样也会受到土壤机械阻力的影响,而土壤机械阻力由土壤物理结构决定^[28]。通过降低土壤容重、增加土壤总孔隙度和优化土壤团聚体特征等手段改善土壤物理结构均可以促进根系的伸长,尤其是向更深层土壤的延伸^[29-30]。例如,施用有机肥或生物炭等添加剂能够有效地改善土壤物理结构,促进根系向深层生长^[10]。因此,在黄土高原地区,通过品种更替、增加密度、优化肥料施用以及改善土壤结构能够有效促进冬小麦根系生长,增加冬小麦在深层土壤中分布密度,最终提高深层水利用率。

6 优化农艺措施,提高深层水利用、实现高产稳产(以长武为例)

陕西省长武县位于黄土高原南部渭北旱塬,多年平均降水量534 mm^[10]。尽管该地区冬小麦生育期内降水量仅占年降水量1/2左右,但其0~3 m土层内的储水量在冬小麦播种时达618~820 mm^[6]。近年来,一项在渭北旱塬为期5 a的调查结果表明,

该地区冬小麦平均产量仅为 $4\ 243\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2[31]}$, 进一步调查表明当产量在 $4\ 243\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右时, 麦田收获期 1~2 m 和 2~3 m 深层水残留量分别高达 173~224 mm 和 203~246 mm^[10,32-33]。因此, 麦田中深层水利用不足是导致该地区冬小麦产量水平偏低的重要原因, 通过提高深层土壤水的利用, 该地区冬小麦产量和水分利用效率可能还有很大的提升空间。

基于此, 本课题组在当地农户种植模式的基础上, 构建了以增加深层水利用为核心的高产稳产技术模式, 该模式通过适当增加小麦播量来使根系横向分布收缩且纵向分布加深; 通过分期施氮诱发根系早期的“觅食行为”, 防止根系后期的早衰; 通过配施了有机肥改善土壤理化性质, 促进根系的向下伸长(图 4)。

通过为期 5 a 的田间试验表明, 相比于农户模式, 高产模式增加了深层根系分布, 麦田收获期 1~2 m 和 2~3 m 深层水残留量分别降低了 6~15 mm 和 4~24 mm, 产量和水分利用效率分别提高了 16%~

31% 和 14%~29%(表 1), 证实了在该地通过增加深层水的利用, 冬小麦产量还有较大提升空间。

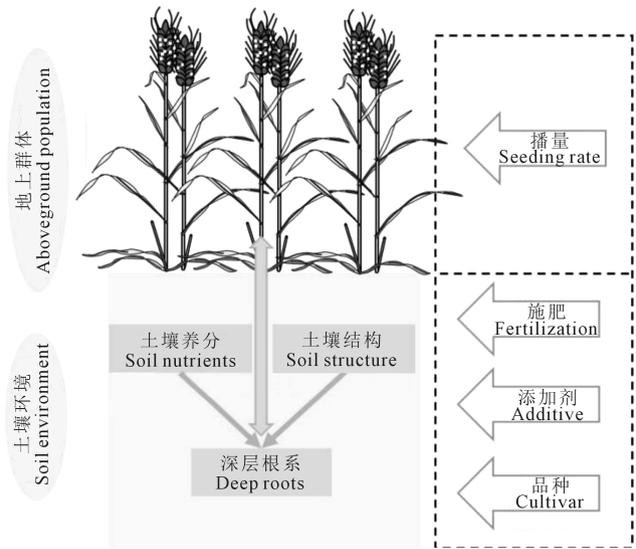


图 4 黄土高原麦田深层根系调控途径

Fig.4 The way of increasing wheat root density in subsoil on the Loess Plateau

表 1 不同栽培模式对收获期土壤水残留量、冬小麦产量及水分利用效率的影响

Table 1 Effects of different treatments on soil water storage at harvest time, wheat yield and water use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	收获期土壤水残留量 Residual soil water/mm			产量 Grain yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
		0~1 m	1~2 m	2~3 m		
2014-2015	农户模式 FP	191a	195a	219a	3714b	7.86b
	高产模式 HP	197a	189a	215a	4300a	9.00a
2015-2016	农户模式 FP	125a	151a	188a	5946b	13.94b
	高产模式 HP	119a	138b	164b	7265a	15.84a
2016-2017	农户模式 FP	180a	185a	205a	4596b	9.66b
	高产模式 HP	178a	174b	188b	5927a	12.49a
2017-2018	农户模式 FP	133a	179a	204a	4659b	10.81b
	高产模式 HP	131a	167b	180b	6109a	13.80a
2018-2019	农户模式 FP	234a	190a	207a	5186b	12.06b
	高产模式 HP	227a	175b	191b	6621a	15.23a
平均值 Average	农户模式 FP	173a	180a	205a	4820b	13.10b
	高产模式 HP	170a	169b	188b	6044a	15.90a
变异来源 Source of variation	df					
年份 Years	4	**	**	**	***	***
处理 Treatments	1	ns	**	**	***	***
年份×处理 Years×Treatments	4	ns	ns	ns	ns	ns

注: 不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平 ($P < 0.05$), ** 和 *** 分别代表不同年型、不同处理以及年型×处理下差异达到 1% 和 0.1% 显著水平, ns 代表无显著差异(引自 Yang 等^[22])。

Note: Different lowercase letters indicate that the difference between treatments has reached a significant level ($P < 0.05$), ** and *** indicate that the difference reached 1% and 0.1% significant levels under treatment, ns indicates no significant difference (quoted from Yang et al. ^[22]).

7 总 结

在雨养旱作农业中,降雨更多地进入土壤储存并尽可能多地被作物吸收利用是提高旱作农业中作物产量和水分利用效率的关键。已有研究结果表明,在黄土高原冬小麦收获后,土壤1 m以下土层中仍残留了大量的深层水未被有效利用。本文基于对黄土高原地区以往研究数据分析,表明当前冬小麦产量水平下土壤水利用并不充分,且有进一步提升空间。深入分析表明,1~2 m 深层土壤水的残留量和产量及高产概率高度相关,且增加深层土壤水的利用可以显著提高产量和高产概率;本文进一步定量分析不同水分条件(播前储水和生育降雨)下土壤深层水残留量和产量及高产概率的关系。此外,本文还讨论了如何通过品种和农艺措施调控小麦对深层土壤水的充分利用,并用实际研究案例表明在该区域通过优化农艺措施增加深层水利用从而提高产量和水分利用效率是可行的。因此,调控深层水的利用是进一步提高黄土高原小麦产量和产量稳定性的重要途径。

虽然增加土壤水的利用可以显著提高产量和水分利用效率,但在黄土高原土壤储水长时间得不到补充就会导致水分失衡,在土壤剖面上形成土壤干层(含水率低于凋萎系数)。降水是黄土高原土壤水分唯一的补给途径,降水在年际间、区域间的分布会对土壤干层的形成产生较大的影响。此外,地表植被对土壤储水的消耗也是旱地形成土壤干层的重要原因之一。如果深层储水被过度消耗且降水量不足以补充,就可能形成深层土壤干层,影响后续作物生长。因此在不同的降水区域,不同水分条件下,深层水被利用后能够得到补充而不会形成土壤干层的利用阈值还需进一步研究。

在高饱和蒸气压差的影响下,黄土高原疏松的黄土性土壤中的水分在全年大部分时间中处于向上运移的状态。因此,黄土高原地区3 m以下的深层水也可能会运移至上层土壤被小麦吸收利用。此外,有研究表明在黄土高原5 m深度土层中都能够观察到小麦根系分布,故3 m以下的深层水也可能被更深层的小麦根系吸收利用。目前绝大多数有关小麦土壤水利用的研究仅研究了3 m土层以内的土壤水分变化,并未考虑更深层土壤水的运移及利用,而这部分深层水对产量和水分利用效率的贡献仍待研究。

参 考 文 献:

- [1] BURRELL A L, EVANS J P, DE KAUWE M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3853.
- [2] LI S X, XIAO L. Distribution and management of drylands in the People's Republic of China[C]//STEWART BA. *Advances in soil science*. New York, NY:Springer, 1992: 147-302.
- [3] HE G, WANG Z H, LI F C, et al. Soil water storage and winter wheat productivity affected by soil surface management and precipitation in dryland of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 1-9.
- [4] TRNKA M, FENG S, SEMENOV M A, et al. Mitigation efforts will not fully alleviate the increase in water scarcity occurrence probability in wheat-producing areas [J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaau2406.
- [5] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [6] HUANG M B, DANG T H, GALLICHAND J, et al. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(3): 267-278.
- [7] 马元喜. 不同土壤对小麦根系生长动态的研究[J]. *作物学报*, 1987,(1): 37-44.
MA Y X. A study on growing dynamic of wheat root system in various soils[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1987,(1): 37-44.
- [8] 苗果园, 张云亭, 尹钧, 等. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究[J]. *作物学报*, 1989,(2): 104-115.
MIAO G Y, ZHANG Y T, YIN J, et al. A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid Loess Plateau[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1989,(2): 104-115.
- [9] LI B B, LI P P, ZHANG W T, et al. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2021, 399: 115122.
- [10] YANG W J, LI Y L, LIU W J, et al. Sustainable high yields can be achieved in drylands on the Loess Plateau by changing water use patterns through integrated agronomic management[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: 108210.
- [11] 李玉山. 黄土地区土壤水分的特征和利用[J]. *土壤*, 1978,(2): 46-47.
LI Y S. Characteristics and utilization of soil water in loess region[J]. *Soils*, 1978,(2): 46-47.
- [12] FANG Y, XU B C, LIU L, et al. Does a mixture of old and modern winter wheat cultivars increase yield and water use efficiency in water-limited environments? [J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 12-21.
- [13] WANG J, LIU W Z, DANG T H. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 41-51.
- [14] ZHANG D B, YAO P W, NA Z, et al. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in re-

- sponse to green manure approach [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26856.
- [15] YANG W J, CHANG F, MA D K, et al. Subsoil water use to attain stable high yields of winter wheat in drylands Loess Plateau of China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 139: 126558.
- [16] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, et al. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9-18.
- [17] JIN N, REN W, TAO B, et al. Effects of water stress on water use efficiency of irrigated and rainfed wheat in the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1-11.
- [18] UNKOVICH M, BALDOCK J, FARQUHARSON R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia—a review [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 205: 72-80.
- [19] DAI J, WANG Z H, LI M H, et al. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China [J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 180-190.
- [20] YANG W J, LIU W J, LI Y L, et al. Increasing rainfed wheat yield by optimizing agronomic practices to consume more subsoil water in the Loess Plateau [J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1418-1427.
- [21] CONDON A G, RICHARDS R A, FARQUHAR G D. Relationships between carbon isotope discrimination, water use efficiency and transpiration efficiency for dryland wheat [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1993, 44(8): 1693-1711.
- [22] ANGUS J F, VAN HERWAARDENA F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 290-298.
- [23] KIRKEGAARD J A, LILLEY J M, HOWE G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(4): 303-315.
- [24] NOSALEWICZ A, LIPIEC J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat [J]. *Plant and Soil*, 2014, 375(1): 229-240.
- [25] 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.
- CHENG L P, LIU W Z. Contribution of soil water at various depths to water consumption of rainfed winter wheat in the Loess tableland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2285-2291.
- [26] 燕晓娟, 张岁岐, 王宗仁, 等. 半干旱地区不同年代冬小麦品种根系生长和水分利用效率对种植密度的响应 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 32-36.
- YAN X J, ZHANG S Q, WANG Z R, et al. Responses of root growth and water use efficiency to planting density for winter wheat varieties from different eras in semi-arid region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 32-36.
- [27] WANG L L, PALTA J A, CHEN W, et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 41-53.
- [28] BENGOUGH A G, MULLINS C E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses [J]. *European Journal of Soil Science*, 1990, 41(3): 341-358.
- [29] MOSADDEGHI M R, MAHBOUBI A A, SAFADOUST A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 173-179.
- [30] XIAO Q, ZHU L X, ZHANG H P, et al. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth [J]. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(5): 495-507.
- [31] 曹寒冰, 王朝辉, 赵护兵, 等. 基于产量的渭北旱地小麦施肥评价及减肥潜力分析 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2758-2768.
- CAO H B, WANG Z H, ZHAO H B, et al. Yield based evaluation on fertilizer application and analysis of its reduction potential in Weiwei dryland wheat production [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2758-2768.
- [32] 张益望, 刘文兆. 补充灌溉及氮磷配施对黄土塬区冬小麦水分利用及产量的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 76-81.
- ZHANG Y W, LIU W Z. Effects of supplemental irrigation and different nitrogen and phosphorus rates on yield and water use efficiency of *Triticum aestivum* L. on Loess Tableland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 76-81.
- [33] 刘俊梅, 曲超, 杨学云, 等. 播种密度对秸秆覆盖旱地冬小麦产量和土壤水分的影响 [J]. *西北农业学报*, 2014, 23(9): 36-43.
- LIU J M, QU C, YANG X Y, et al. Effect of seeding rate on winter wheat yield and soil water dynamics under straw mulching on dryland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(9): 36-43.