

DOI: 10.5846/stxb201306031290

方燕, 徐炳成, 谷艳杰, 刘倩倩, 李凤民. 密度和修剪对冬小麦根系时空分布和产量的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1820-1828.

Fang Y, Xu B C, Gu Y J, Liu Q Q, Li F M. Effects of seeding rate and root pruning at different growth stages on spatiotemporal root distribution, soil water use and grain yield of winter wheat in Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1820-1828.

密度和修剪对冬小麦根系时空分布和产量的影响

方 燕^{1, 2}, 徐炳成¹, 谷艳杰², 刘倩倩², 李凤民^{2, *}

1 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 水土保持研究所, 西北农林科技大学, 杨凌 712100

2 兰州大学生命科学学院, 草地农业系统国家重点实验室, 兰州 730000

摘要:田间试验研究了种植密度和不同时期根修剪对黄土旱塬冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 根系时空分布、土壤水分利用以及产量的影响。供试材料为该地区广泛种植的冬小麦品种长武 135。试验设定 4 个密度处理: SR1、SR2、SR3 和 SR4, 分别为 180、225、280 和 340 株/m², 其中 SR2 为常规密度; 以及 4 个根修剪处理: CK (不剪根处理)、W (越冬期根修剪)、S (返青期根修剪) 和 B (越冬期根修剪+返青期根修剪)。研究结果表明, 冬小麦返青期、孕穗期和花期根系总干重随种植密度的增加而增加。根修剪处理显著降低了各生育期冬小麦根系总干重, 不同处理间排序为 CK>W>S>B。种植密度和根修剪对冬小麦根系总长度的影响与根系总干重类似, 各处理间根系总干重和根系总长度的差异主要来自于 0—20 cm 表土层。冬小麦表土层 (0—20 cm) 中的根干重密度 (DRWD) 和根长密度 (RLD) 都随种植密度的提高而增加。根修剪降低了返青期、孕穗期和花期冬小麦 DRWD 和 RLD 在 0—20 cm 表土层中的分布, 但增加了花期 60—100 cm 深土层中的 DRWD 和 RLD。整个生育期土壤水分消耗随种植密度增加而增加, 而根修剪显著减少土壤水分的消耗。冬小麦的产量和水分利用效率随着种植密度增加而显著提高。根修剪处理显著增加了冬小麦的产量, 且 W 处理的产量最高, 同时根修剪也显著提高了冬小麦的水分利用效率。由此可见, 越冬期根修剪 (W) 可以最大程度提高冬小麦产量。考虑到经济效益, 建议旱地雨养农业区在较高的密度下进行越冬期根修剪处理, 从而达到生产上高产高效的目的。

关键词:冬小麦 (*Triticum aestivum* L.); 根系; 垂直分布; 土壤含水量; 黄土旱塬

Effects of seeding rate and root pruning at different growth stages on spatiotemporal root distribution, soil water use and grain yield of winter wheat in Loess Plateau

FANG Yan^{1, 2}, XU Bingcheng¹, GU Yanjie², LIU Qianqian², LI Fengmin^{2, *}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystems, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The field experiment was conducted to investigate the effects of seeding rate and root pruning of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages on spatiotemporal root distribution, soil water consumption and grain yield in Loess Plateau. The cultivar used in the experiment was 'Changwu 135', which is widely cultivated in the region. There were four seeding rate treatments: SR1, SR2, SR3 and SR4 in corresponding to 180, 225, 280 and 340 plants m⁻², respectively, and the SR2 was the seeding rate in the farmer field; in conjunction with three root pruning treatments: W (root pruning in the over-wintering period), S (root pruning at the spring-growth stage), B (root pruning in the over-

基金项目:国家自然科学基金 (30625025); 中国科学院水利部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基金 (10501-1216)

收稿日期: 2013-06-03; 网络出版日期: 2014-07-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fmli@lzu.edu.cn

wintering period and root pruning at the spring-growth stage), with the un-pruned wheat plants as control (CK). The results showed that the total root weight of winter wheat increased with the increase in seeding rate at returning green, booting and anthesis stages; root pruning significantly reduced the total root weight in each growth stage, with the order of CK>W>S>B. The similar trend of total root length was also observed in seeding rate and root pruning treatments. The most difference of total root weight and total root length among each treatment was observed at the depth of 0—20 cm soil layer. Higher seeding rate led to higher dry root weight density (DRWD) and root length density (RLD) at the depth of 0—20 cm. Root pruning reduced the distribution of DRWD and RLD at 0—20 cm soil depth at returning green, booting and anthesis stages, but increased the DRWD and RLD at the depth of 60—100 cm soil layers at anthesis. The soil water consumption increased with increasing seeding rate during whole growing season, whereas the root pruning treatments significantly reduced the soil water consumption when compared with the control. Grain yield and water use efficiency obviously increased as the seeding rate increased. The grain yield of root pruning treatments were significantly higher than that of control, and greatest yield was observed in W. The water use efficiency (WUE) was improved by the root pruning treatments. Therefore, the grain yield of winter wheat could be potentially improved by root pruning at over-wintering period. Considering the possible economic benefits, we suggests that higher seeding rate combined with root pruning during the over-wintering period, for winter wheat in rainfed agricultural region of dry land, can ensure greater grain yield and availability of water.

Key Words: winter wheat (*Triticum aestivum* L.); roots; vertical distribution; soil water content; Loess Plateau

旱地雨养农业区,水分胁迫是作物产量最主要的限制因子。部分学者青睐于大根系的旱地品种,认为大根系有利于吸收更多的水分^[1],并以根系大小作为作物抗旱性强弱的指标^[2]。但为获取水分资源而将有限的同化物分配给根系生长,必然会减少同化物对籽粒的投入,即旱地小麦资源获取器官的过度增殖会引起籽粒产量的下降^[1]。近期研究也发现,现代小麦较高的产量潜力与根系生物量降低有关^[1, 3],因此以往追求庞大根系的育种思想在旱区小麦的生产实践中越来越受到质疑^[3-5]。

作物生产是一个种群过程^[6],合理的种植密度对小麦群体发育及产量的提高具有重要作用。关于种植密度对小麦群体影响的研究主要集中在地上部分^[7-9]。过高的种植密度导致根干重增加,加剧作物对土壤水分的消耗^[7, 10],进而对群体产量不利^[11]。通过合理的农艺措施促进地上、地下群体协调发展,实现作物的高产以及水资源的高效利用,一直是旱地农业研究的重点^[12-13]。

目前根修剪对作物产量及水分利用率的正负效应均有报道^[13-18]。已有的研究发现冬小麦在根修剪后降低了根干重,提高了水分利用效率,但对产量没有影响^[19];而对根修剪后根系构型的变化(如根干重密度和根长密度等)没有进行深入研究。同时,冬小麦根修剪后根系干重的减少是否为密植提供可能也值得进一步探讨。本研究通过不同的种植密度和根修剪处理,来探讨冬小麦根系生物量及其空间分布与产量和水分利用效率的关系,为旱区冬小麦高产高效的栽培管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验地位于黄土高原中部的陕西省长武县洪家乡王东村中国科学院长武生态试验站,地理位置 107°40'30"E, 35°14'30"N,海拔 1200 m,本区属暖温带半湿润易旱气候区,年均降水 577 mm,年均气温 9.1 °C, ≥10 °C 的积温 3029 °C,无霜期 171 d。试验布置在未进行灌溉的旱作农耕地上。试验地平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄粘黑垆土。

2008—2009 年月平均温度和降水量如图 1。试验当季降水共 494 mm,与多年平均(1957—2001: 576 mm)相比,全年降水量减少 14%;冬小麦生长当季降水为 184 mm,与多年平均(273 mm)相比,降水减少了

33%,但冬小麦花期至灌浆期(5月)的降水量高于多年平均9%。由此可见,本实验冬小麦在营养生长期受到一定的干旱胁迫。

试验品种为旱作冬麦品种长武135号,试验于2008—2009年进行,小区面积 $9\text{ m}^2(3\text{ m}\times 3\text{ m})$,小区间间隔 60 cm ,3次重复,随机区组设计。亩施磷酸二铵(含N量18%,含 P_2O_5 量46%) 40 kg ,所有肥料在播种时作为底肥一次施入。于2008年9月25日播种,播种方式为人工点播,行距 20 cm 。实验设置4个密度:SR1($180\text{ 株}/\text{m}^2$);SR2($225\text{ 株}/\text{m}^2$);SR3($280\text{ 株}/\text{m}^2$);SR4($340\text{ 株}/\text{m}^2$),其中SR2为常规密度。3个根修剪处理:W(越冬期根修剪11月15日);S(返青期根修剪3月15日);B(越冬期根修剪+返青期根修剪);不剪根处理作为对照(CK)。根修剪时在距基部 3 cm 处,用长 25 cm ,带刻度标记的单面刀,垂直下切 13 cm ,去掉部分侧生根。

1.2 采样与测定

1.2.1 土壤含水量测定

分别于播种期,拔节期和成熟期测定土壤含水量。

$20\text{—}200\text{ cm}$ 土层使用水分中子仪(美国CPN公司503DR),地表到 20 cm 之间用土钻取土烘干称重法测定。

1.2.2 根系形态指标测定

分别在冬小麦主要的生育期(返青期、孕穗期和花期)用根钻取样,根钻钻头直径为 9 cm ,长 10 cm 。取样时,采用Bolinder等的方法取样,即每小区行上打1钻,行间打2钻,三钻合一为同一土层根系样品。分别于 $0\text{—}20\text{ cm}$, $20\text{—}40\text{ cm}$, $40\text{—}60\text{ cm}$, $60\text{—}80\text{ cm}$ 及 $80\text{—}100\text{ cm}$ 分层取样。所取根土样用400目尼龙网过滤冲洗,洗去泥土后移入玻璃器皿再用清水漂洗,仔细除去草根杂物。取新鲜冬小麦根系用4%的亚甲基蓝染色10分钟,用扫描仪扫描根系后,用Delta-TSCAN根系分析系统软件进行分析,从而获得各土层样品中根系的总根长。然后用吸水纸吸干根系,将其置于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下快速杀死半小时,在恒温 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 12 h 后用万分之一天平称量,即可得到根干重。

根干重(根长)密度是指单位土壤体积的根干重(根长)。由此根干重密度(DRWD)和根长密度(RLD)分别由式(1)和(2)确定:

$$\text{DRWD} = M/V \quad (1)$$

$$\text{RLD} = L/V \quad (2)$$

式中,DRWD为根干重密度($\times 10^{-4}\text{ g}/\text{cm}^3$),RLD为根长密度(cm/cm^3), M 为根系干重(g), L 为根长(cm), V 为土体体积(cm^3),土体体积由式(3)确定:

$$V = \pi r^2 h \quad (3)$$

式中, r 为钻头半径($r=4.5\text{ cm}$), h 为取样深度($h=20\text{ cm}$)。

总根长(干重)是指单位土壤面积的根长(干重),即单位土壤面积的不同土层根长(干重)之和。

1.2.3 产量和水分利用效率

成熟时在各小区中间取 1.0 m^2 测定单位面积的成穗数、籽粒产量和地上生物量。每小区取20茎测穗粒数和千粒重等,并计算收获指数。

产量水分利用效率(WUE_g)按以下公式计算:

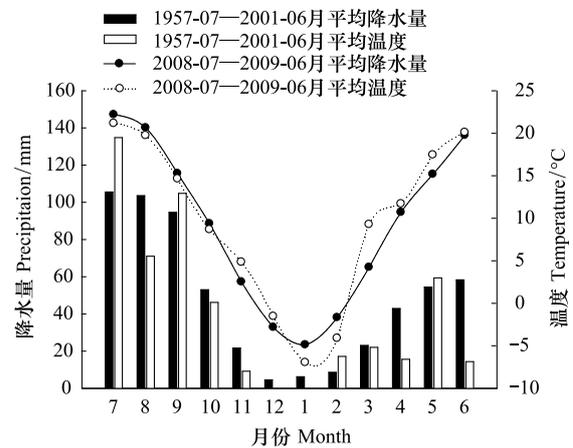


图1 试验当季(2008—2009)与多年平均(1957—2001)降水量(mm)和温度($^\circ\text{C}$)图

Fig.1 Precipitation (histograms) and temperature (circles) in 2008—2009 (white histograms and open circles) and the long-term (1957—2001) means (black histograms and closed circles) at the experimental site at Changwu Agricultural Research Station, Shaanxi Province, China

产量水分利用效率($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) = 单位面积籽粒产量/耗水量

式中,耗水量为播种与收获时 0—200 cm 土壤水分的差值加上生育期的降雨量。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理,采用 Sigmaplot 12.0 软件进行绘图,采用 SPSS 20.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 种植密度和根修剪对根系总干重及干重密度垂直分布的影响

不同处理下 0—100 cm 土层根系总干重的变化趋势见表 1。各密度处理的根系总干重返青后迅速增加,花期达到最大值。返青期时,4 个密度的总根系生物量随密度的提高显著增加;孕穗期和花期根系总干重也随密度提高而增加,但 SR3 和 SR4 没有差异。与对照相比,根修剪处理在各生育期均显著减少了总根生物量。根系总干重大小排序为 $\text{CK} > \text{W} > \text{S} > \text{B}$,且处理间差异显著。说明随根修剪时间的推迟和次数的增加,根干重下降越明显,断根程度越严重(表 1)。

表 1 不同处理冬小麦根系总干重(g/m^2)和根系总长度(m/m^2)动态变化

Table 1 The dynamics of total root weight and total root length of winter wheat at different treatments

| 处理 Treatment | 总根重 Total root weight/ (g/m^2) | | | 总根长 Total root length/ $(\times 10^3 \text{ m}/\text{m}^2)$ | | |
|------------------------------------|--|----------------|----------------|---|----------------|----------------|
| | 返青期 Returning green stage | 孕穗期 Booting | 花期 Anthesis | 返青期 Returning green stage | 孕穗期 Booting | 花期 Anthesis |
| 密度 Seeding rate (株/ m^2) | | | | | | |
| 180 (SR1) | 97.50d | 232.8c | 317.3c | 3.26d | 7.77c | 11.50c |
| 225 (SR2) | 116.1c | 241.8b | 353.4b | 4.22c | 8.67b | 13.31b |
| 280 (SR3) | 129.4b | 252.5a | 401.8a | 4.59b | 8.95ab | 15.19a |
| 340 (SR4) | 154.2a | 258.6a | 403.8a | 5.64a | 9.20a | 15.08a |
| 根修剪 Root pruning | | | | | | |
| CK | 134.4a | 270.4a | 413.0a | 4.64a | 9.38a | 14.50a |
| W | 114.1b | 246.2b | 377.7b | 4.22b | 8.75b | 14.13a |
| S | — | 239.8c | 349.4c | — | 8.34c | 13.45b |
| B | — | 229.3d | 336.2d | — | 8.11d | 13.01b |

同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) CK:不剪根处理;W:越冬期根修剪;S:返青期根修剪;B:越冬期根修剪+返青期根修剪

根干重密度是根系分布的重要指标之一。由图 2 可知,随生育期进展,不同密度处理在各土层中的根干重密度差异逐渐减小。返青期时,W 在 0—80 cm 各土层的根干重密度显著低于 CK;孕穗期 CK 在 0—20 cm 的根干重密度显著高于根修剪处理,W 和 S 之间无显著区别,但都显著高于 B 处理;花期时,各土层根干重密度达到最大。与 CK 相比,W,S 和 B 在 0—20 cm 以上土层中根干重密度分别减少了 16.3%,27.7%和 31.6%。在 60—100 cm 土层中,根干重密度为 $\text{B} > \text{S} > \text{W} > \text{CK}$,S 和 B 处理之间没有差异(图 2)。

由此可见,根修剪虽然减少了冬小麦表层根系,却促使根系向深层发展,增加深层根系的分布数量,有利于提高冬小麦对深层土壤水分的吸收利用,对产量的提高有重要意义。

2.2 种植密度和根修剪对根系总长度及根长密度垂直分布的影响

种植密度对冬小麦根系总根长的影响与根系总干重一致(表 1)。孕穗时 SR3 的根系总长度已达到 SR4 水平。根修剪降低了根系总长度,与根系总干重变化不同的是,CK 与 W 在花期时无显著差异,但显著大于 S 和 B。说明花期时 W 处理的根系总长度已恢复至对照水平。

根长密度是表示根系长度在单位土体中的分布参数。种植密度和根修剪对各土层中根长密度的影响与其对根干重密度的影响相似。由图 3 可见,提高密度增加了根长密度,根修剪处理减少了表层土壤中的根长密度却显著增加了深土层的根长密度。

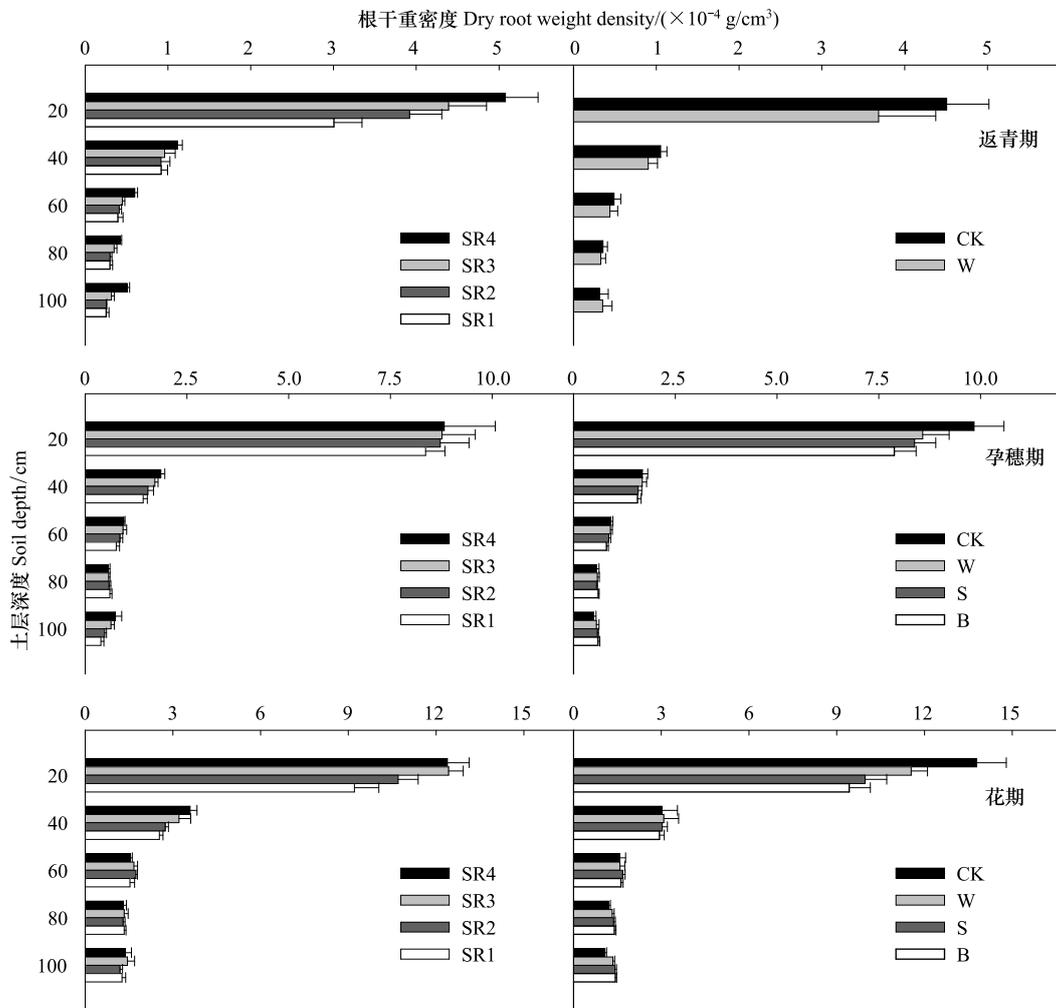


图2 不同生育期冬小麦根系干重密度在0—100 cm 土层垂直分布

Fig.2 The vertical distribution of dry root weight density of winter wheat in soil depth of 0—100 cm at different growth period

2.3 种植密度和根修剪对土壤水分消耗的影响

由图4可知,提高密度增加了冬小麦的水分消耗。拔节期SR1在0—160 cm处的土壤含水量显著高于其它3个密度处理;成熟期,SR1的土壤含水量在0—180 cm处仍显著高于SR3和SR4,而与SR2仅在80—140 cm土层没有差异。此外,成熟期时表层土壤干旱严重,根系受到水分胁迫。

拔节期各土层土壤水分含量排序为B>S>W>CK,处理间差异显著。成熟期时,B显著高于S,S和B显著高于CK,而W与CK在各土层的土壤水分含量没有差异。这一结果表明根修剪延迟了冬小麦生长季中对土壤水分的消耗。越冬期根修剪节约了返青前的土壤水分消耗,返青期根修剪减少了对返青—成熟期的土壤水分利用,而B处理由于进行了两次根修剪,土壤耗水最少,土壤水分含量最高(图4)。

2.4 种植密度和根修剪对产量、产量性状及水分利用效率的影响

由表2可以看出,冬小麦产量随密度的增长呈上升趋势,各密度处理间差异显著。小麦单位面积产量是穗数、穗粒数和粒重综合作用的结果。结果表明,冬小麦总穗数和穗粒数及水分利用效率都随密度提高而显著增加。SR1和SR2的收获指数显著高于SR3和SR4(表2)。

3个根修剪处理的冬小麦产量显著高于不剪根处理,其中W的产量显著高于B,S与W、B没有差异(表2)。与CK相比,3个根修剪处理对总穗数和穗粒数没有影响,但W的穗数显著高于S与B。3个根修剪处理的千粒重显著高于不剪根处理。W和S的收获指数显著高于B和CK。根修剪处理的水分利用效率均显著

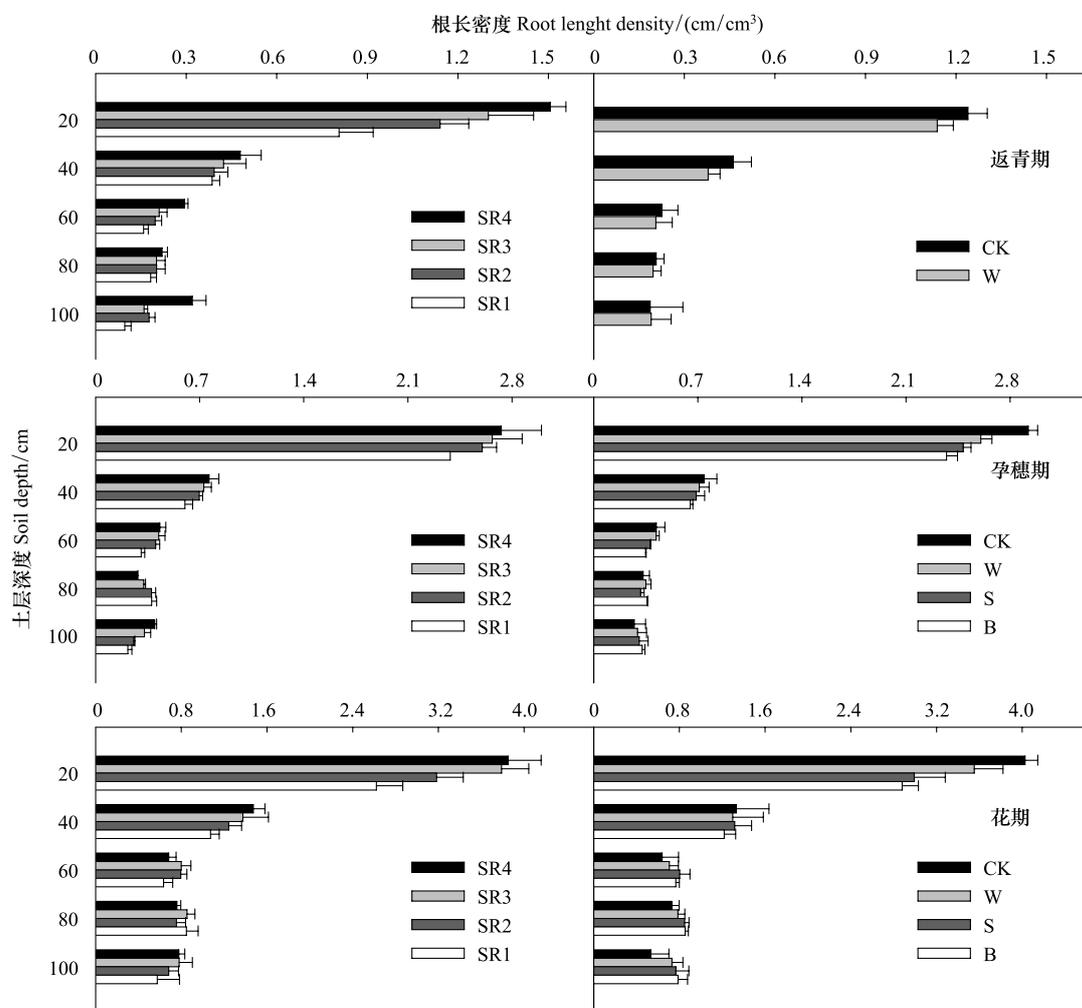


图3 不同生育期冬小麦根长密度在0—100 cm 土层垂直分布

Fig.3 The vertical distribution of root length density of winter wheat in soil depth of 0—100 cm at different growth period

高于对照(表2)。由此可见,与CK相比,根修剪均显著提高冬小麦产量和水分利用效率,其中越冬期根修剪W处理增产能力最强,而对水分利用效率的影响,W,S和B之间没有差异。

3 讨论

对于作物生产而言,不仅存在地上群体问题,同样存在地下群体问题^[10]。较高的密度导致冬小麦表层根系和群体根系总干重增加。然而随生育期推进,根系增加量逐渐减小,因此单位土体中的根干重生育前期差异大,后期差异小^[10]。3个根修剪处理都显著减少了根系总干重和根系总长度,但在花期时,越冬期根修剪的总根长与对照相比没有差异。说明随着生育期进展,较早时期的根修剪处理总根长可以恢复到对照水平。目前对根系分布的描述主要通过根干重密度(DRWD)和根长密度(RLD)来表示的,这是根系研究的重要指标^[20]。与根干重密度相比,根长密度更能体现根系的吸水活性^[21]。与前人研究结果一致,根长密度随种植密度的增加而增大,并且种植密度对上层根长密度的影响大于下层^[22]。适当增加种植密度,有利于单位体积土壤中根系数量和根活力的提高^[20]。本研究中,提高密度增加了深土层的根长密度,这可能是由于高密度增加了土壤耗水,尤其增加了表层土壤的水分消耗,导致表土层干旱而迫使更多根系到深层土壤中寻找水分,因而密度的提高增加了深层土壤的根系分布数量^[23]。根修剪处理都显著降低了0—20 cm的表土层的根干重密度和根长密度。与前人研究结果不同^[19],研究发现,花期时各根修剪处理均显著增加了深层土壤

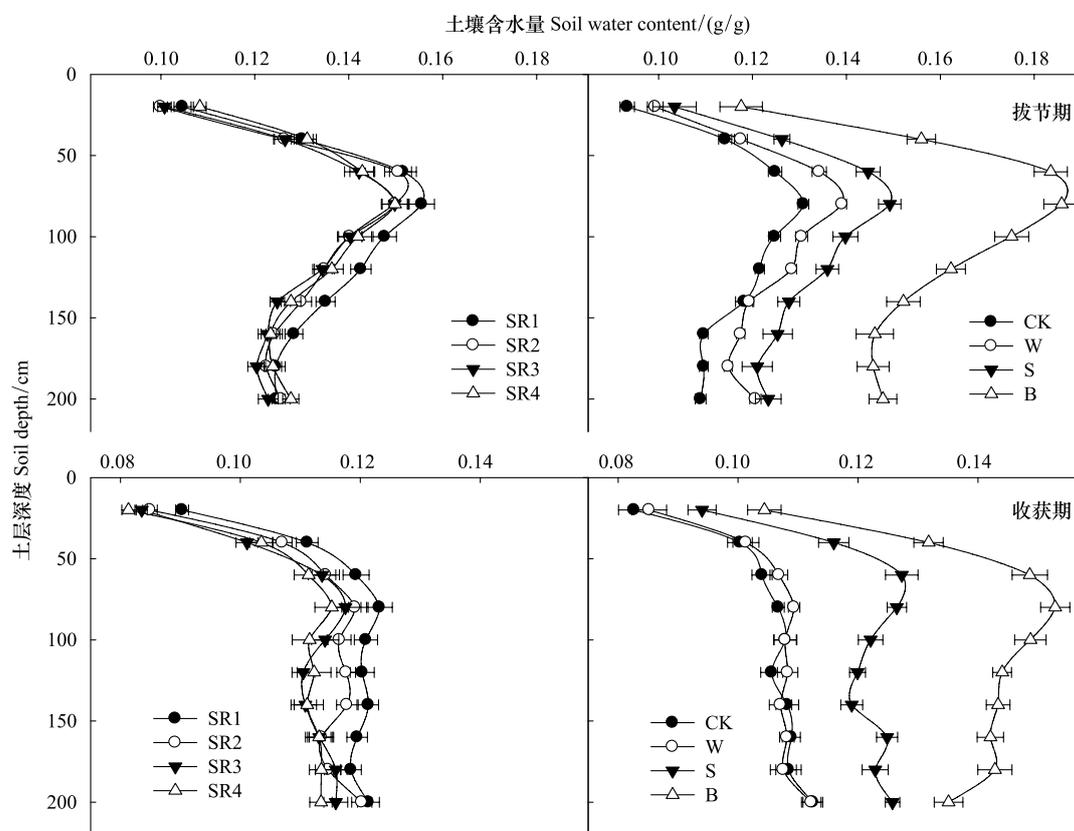


图4 各处理冬小麦土壤含水量的动态变化

Fig.4 Dynamic change of soil water content of winter wheat at different treatments

表2 密度和根修剪处理对冬小麦产量、产量性状和水分利用率的影响

Table 2 Effects of seeding rate and root pruning on grain yield, yield traits and water use efficiency of winter wheat

| 处理 Treatment | 产量 Grain yield/ (g/m ²) | 穗数 Spike density (No./m ²) | 穗粒数 No. of 粒 (grains/m ²) | 千粒重 Thousand Kernel Weight/g | 收获指数 Harvest Index | 产量水分利用率 Water use e fficiency of grain/ (g m ⁻² mm ⁻¹) |
|-------------------------------------|---|--|---|------------------------------------|-----------------------|--|
| 密度 Seeding rate (株/m ²) | | | | | | |
| 180 (SR1) | 431.2d | 501.0d | 10181.8d | 49.15a | 0.50a | 1.41d |
| 225 (SR2) | 544.7c | 656.3c | 13707.8c | 47.55b | 0.52a | 1.84c |
| 280 (SR3) | 598.8b | 808.5b | 15777.3b | 47.74b | 0.46b | 2.00b |
| 340 (SR4) | 663.1a | 909.1a | 17870.5a | 48.55ab | 0.44b | 2.21a |
| 根修剪 Root pruning | | | | | | |
| CK | 531.7c | 724.7ab | 14347.9a | 46.98b | 0.45b | 1.73b |
| W | 583.1a | 756.7a | 14634.7a | 48.77a | 0.50a | 1.91a |
| S | 566.5ab | 700.8b | 14335.1a | 48.83a | 0.51a | 1.92a |
| B | 556.4b | 692.8b | 14219.7a | 48.42a | 0.46b | 1.89a |

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); CK: 不剪根处理; W: 越冬期根修剪; S: 返青期根修剪; B: 越冬期根修剪+返青期根修剪。

(60—100 cm) 中的根长密度。随根修剪处理时间的推后和次数的增加, 使得表层根系缺失严重, 生长恢复缓慢, 迫使作物根系向更深层次发展。当深层土壤中尚保留许多可利用水的情况下, 浅层根系的减少是对作物有益的。在田间栽培条件下, 土壤干旱从上向下逐渐减弱, 上层土壤中根系积累的 ABA 高于下层土壤, 上层根系过多会导致大量的 ABA 运送到叶片而使气孔阻力增大, 进而降低冬小麦光合作用^[24]。Blum 等研究表明, 上层根少、下层根多的品种对土壤干旱和根化学信号敏感性较低; 而上层根多、下层根少的品种则表现出

较高的根信号敏感性,最终产量显著低于前者^[25]。另外,水分亏缺下深层土壤根系的增加对土壤有效水的吸收也起到积极作用^[26]。而在春小麦及谷子的盆栽干旱实验也发现,苗期适度进行根修剪能显著提高作物产量及水分利用效率^[15-18]。

不同的种植密度显著影响作物个体内部对光照、水分和肥料的竞争,因而影响作物对环境资源的利用^[7]。水分限制环境下,较高的密度会引起耗水增加,使作物个体对土壤水分竞争加剧^[7]。前人研究发现,冬小麦耗水量与根量呈正相关关系,根量越多,耗水量越大^[27]。本研究中提高种植密度增加了土壤水分消耗,土壤含水量显著下降,加重冬小麦的干旱胁迫。根修剪打破了冬小麦原有的根冠平衡,根系的减少导致土壤水分消耗降低,而不同时期根修剪对土壤耗水的影响也不同。越冬期根修剪显著减少了冬前-拔节期的土壤水分;而返青期根修剪节约了返青-成熟期的土壤水分消耗;越冬期根修剪+返青期根修剪处理则显著降低了冬前-成熟期的土壤水分消耗。与两个单次剪根处理相比,越冬期根修剪+返青期根修剪处理由于根修剪处理过多,缺失大量表层根系,并且其恢复生长时间过短,严重影响了根系的吸水功能,因此土壤耗水量显著低于越冬期和返青期根修剪处理。

在旱地雨养农业区,作物如何高效合理的利用土壤水分,也是关系作物在成熟期能否收获籽粒和可以收获多少的主要原因之一^[28]。相同的水分供应,花前耗水过多会增加根系生物量,导致花后土壤墒情恶化,不利于籽粒产量的增加。相反如果有更多的水分留在花后,可以缓解花后水分胁迫程度,有利于延长灌浆和增加籽粒产量^[28]。有研究发现,当小麦在花后发生中等水分胁迫时,每额外获得 1 mm 的深层土壤水分,产量将增加 62 kg/hm²^[29]。根修剪增加了深土层根系,有利于深层土壤水分合理利用。田间试验证明,通过根修剪措施减少了土壤水分的消耗,尤其是减少了花前土壤水分消耗,对花后土壤墒情的改善起到一定作用,利于小麦灌浆,因此根修剪显著提高冬小麦产量和水分利用效率。

旱作条件下,作物根系可能是影响产量形成的主要因素之一,根系修剪直接减少表层根系,同时降低地下竞争,却并未对产量的提高带来任何贡献^[19]。根系在土壤中所占比例的下降,并不意味着其对水分的吸收降低。因为植株根系变小,有机物、矿质元素和水分等相对比较充足,根系活力和吸水能力有可能提高,这为增加种植密度提供了一定的空间和可能^[6]。因此通过密度调控与根系修剪来改善根冠关系实现资源的优化配置,成为提升作物产量的可能手段。本研究通过根修剪减少根系,并通过增加种植密度保持对水土资源的利用,实现了产量和水分利用效率的同步提高,为上述想法提供了一个案例。长期以来黄土高原地区冬小麦产量低而不稳的原因是由于该地区降水的稳定性低,年变率和季节变率很大,水分胁迫常发生在冬小麦灌浆期,因此冬小麦产量常受到影响^[30]。而本实验季仅在营养生长期受到干旱胁迫,花期和灌浆期降水略高于多年平均,最终随种植密度的提高,产量增加显著。越冬期根修剪使冬小麦有较长时间的恢复期,其增产作用最为明显。从经济效益上考虑,提倡旱地雨养农业区在提高密度下进行冬前剪根,以达到生产上高产高效的目的。令人遗憾的是越冬期根修剪+返青期根修剪处理的产量虽然也显著高于不剪根处理,但由于伤根过重,与越冬期和返青期根修剪相比,产量最低,但耗水也最少,收获后仍有大量水分保留在土壤中,而这些水分在干旱年份可以缓解冬后由于降水的不足所引起的干旱胁迫。因此,在降水量更低的干旱半干旱地区,进行两次根修剪或许能够节约更多的水分用于花后灌浆,确保更高的作物产量和合理的土壤水分利用。要使这一措施能更好地应用于旱地农业的生产实践中,今后还需对合理的种植密度和适宜的根修剪时期及其应用地域作进一步研究。

致谢: Neil C. Turner 和 Kadambot Siddique 教授对数据分析和论文写作给予帮助;兰州大学杜彦磊老师帮助修改;长武实验站站长刘文兆老师以及工作人员给予支持,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Zhang D Y, Sun G J, Jiang X H. Donald's ideotype and growth redundancy: a game theoretical analysis. *Field Crops Research*, 1999, 61(2): 179-187.

- [2] Hurd E A. Phenotype and drought tolerance in wheat. *Agricultural Meteorology*, 1974, 14(1/2): 39-55.
- [3] Song L, Li F M, Fan X W, Xiong Y C, Wang W Q, Wu X B, Turner N C. Soil water availability and plant competition affect the yield of spring wheat. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1): 51-60.
- [4] 张荣, 张大勇. 半干旱春小麦不同年代品种根系生长冗余的比较实验研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 298-303.
- [5] 张荣, 孙国钧, 李凤民, 张大勇. 两春小麦品种竞争能力、水分利用效率及产量关系的研究. *西北植物学报*, 2002, 22(2): 235-242.
- [6] 赵松岭, 李凤民, 张大勇, 段舜山. 作物生产是一个种群过程. *生态学报*, 1997, 17(1): 100-104.
- [7] Hiltbrunner J, Streit B, Liedgens M. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Research*, 2007, 102(3): 163-171.
- [8] Arduini I, Masoni A, Ercoli L, Mariotti M. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(4): 309-318.
- [9] Wood G A, Welsh J P, Godwin R J, Taylor J C, Earl R, Knight S M. Real-time measures of canopy size as a basis for spatially varying nitrogen applications to winter wheat sown at different seed rates. *Biosystems Engineering*, 2003, 84(4): 513-531.
- [10] 刘殿英. 种植密度对冬小麦根系的影响. *山东农业大学学报*, 1987, 18(3): 29-35.
- [11] El-Hendawy S, El-Lattief E, Ahmed M, Schmidhalter U. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 836-844.
- [12] 山仑. 科学应对农业干旱. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 1-5.
- [13] 刘文兆, 李秧秧. 断伤作物根系对籽粒产量与水分利用效率的影响研究现状及问题. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1320-1324.
- [14] 柴世伟, 刘文兆, 李秧秧. 伤根对玉米光合作用和水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1716-1718.
- [15] 董桂菊, 刘文兆. 春小麦伤根节水增产效应的试验研究. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 26-29.
- [16] 董桂菊, 刘文兆. 伤根对春小麦光合特性及水分利用效率的影响研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 77-79.
- [17] 柴世伟, 刘文兆, 李秧秧. 伤根对谷子叶片光合速率及其产量的影响. *西北植物学报*, 2004, 24(13): 2215-2220.
- [18] 柴世伟, 刘文兆, 李秧秧, 马守臣. 伤根对谷子水分利用效率的影响. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(1): 5-8.
- [19] Ma S C, Xu B C, Li F M, Liu W Z, Huang Z B. Effects of root pruning on competitive ability and water use efficiency in winter wheat. *Field Crops Research*, 2008, 105(1/2): 56-63.
- [20] Schmidhalter U, Selim H M, Oertli J J. Measuring and modeling root water uptake based on ^{36}Cl discrimination in a silt loam soil affected by groundwater. *Soil Science*, 1994, 158(2): 97-105.
- [21] Coelho E F, Or D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil*, 1999, 206(2): 123-136.
- [22] 王树丽, 贺明荣, 代兴龙, 周晓虎. 种植密度对冬小麦根系时空分布和氮素利用效率的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1839-1845.
- [23] Zhang L Z, Li B G, Yan G T, Van Der Werf W, Spiertz J H J, Zhang S P. Genotype and planting density effects on rooting traits and yield in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(11): 1287-1293.
- [24] Stoll M, Loveys B, Dry P. Hormonal changes induced by partial root zone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(350): 1627-1634.
- [25] Blum A, Johnson J W. Wheat cultivars respond differently to drying top soil and a possible non-hydraulic root signal. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(7): 1149-1153.
- [26] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [27] 李运生, 王菱, 刘士平, 王吉顺. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. *生态学报*, 2002, 22(10): 1680-1687.
- [28] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat. *Agriculture Water Management*, 2001, 49(3): 163-171.
- [29] Kirkegaard J A, Lilley J M, Howe G N, Graham J M. Impact of subsoil water use on wheat yield. *Crop and Pasture Science*, 2007, 58(4): 303-315.
- [30] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, Dawes W. Simulation of winter wheat yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China using WAVES. *Agricultural Systems*, 2003, 78(3): 355-367.