

不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响

康利允^{1,2}, 沈玉芳¹, 岳善超¹, 李世清^{1*}

(1. 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, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100)

摘要: 研究不同水分条件下分层施磷对冬小麦根长分布、水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 及产量的影响, 旨在找出旱地农业最佳水肥处理方式。试验设不施磷 (CK)、表施磷 (surface P, SP)、深施磷 (deep P, DP) 和侧深施磷 (deep-band P, DBP) 4 种处理, 每个施磷水平下分设补充灌溉 (W1) 和干旱 (整个生育期无补充灌溉) (W2) 2 种水分处理。结果表明, 施磷位置及补充灌溉显著 ($P < 0.05$) 影响冬小麦孕穗期根长分布、WUE 及产量, 同时会改变根系空间分布。干旱胁迫使冬小麦 0~<30 cm 土层根长密度下降, 降低 17.5%, 却促进了 30 cm 以下土层根长发育, 增加 13.3%, 促进对土壤水分和磷素的吸收, 从而提高产量。无论灌溉与否, 施磷处理 0~<30 cm 土层根长密度、吸磷量、WUE 及产量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。施磷位置对冬小麦 WUE 和产量的影响随土壤水分而异, 无补充灌溉时, 与磷肥表施相比, 磷肥深施显著增加 WUE 和产量 ($P < 0.05$), 分别平均增加 28.5% 和 16.0%, 且深层根长 (30~100 cm) 与吸磷量、WUE 和产量的变化趋势一致; 而在补充灌溉时, 与磷肥表施相比, 磷肥深施却显著降低 WUE ($P < 0.05$), 平均降低 13.3%, 且深层根长与 WUE、产量的关系缺乏规律性。该试验结果表明, 土壤水分供应不足时, 磷肥深施有利于促进冬小麦深层土壤根系生长发育, 提高对土壤水分吸收利用能力, 从而利于形成高产。该研究可为理解作物生长及产量对水分养分空间耦合的响应提供理论依据。

关键词: 肥料; 灌溉; 水分; 分层施磷; 根长分布; 水分利用效率; 产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.15.019

中图分类号: S365

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-15-0140-08

康利允, 沈玉芳, 岳善超, 等. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 140-147.

Kang Liyun, Shen Yufang, Yue Shanchao, et al. Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 140-147. (in Chinese with English abstract)

0 引言

主要受耕层施肥影响, 大部分植物养分集中在耕层土壤, 而深层土壤养分积累较少, 尤其在土壤中难移动的磷和钾等营养元素更为突出^[1-2]。半干旱雨养农业区蒸发强烈, 降雨后土壤表层迅速干旱, 由于水分亏缺限制耕层养分通过质流 (氮和硫) 及扩散 (磷和钾) 向根系的运输, 土壤耕层供应的营养元素大部分成“无效”养分状态^[3-4], 限制对水分和养分的吸收, 不利于提高作物产量及水分、养分利用率^[5-9]。根是植物吸收土壤中水分和养分的主要

器官, 了解根系的形态、结构与功能是提高作物水分和养分吸收率的关键^[10]。有研究发现, 肥料深施有可能形成一个土壤物理、化学和生物性状不同的深层空间, 通过“Patch”效应促进根系下扎^[11], 在一定程度上有效缓解养分水分空间错位问题, 使水分养分实现空间上的耦合, 有利于吸收利用深层土壤水分和养分, 从而提高产量及水分利用效率^[12]。肥料深施使作物生长季湿润土壤中养分有效性持续时间较长, 提高作物对养分的吸收利用能力^[13]。在表层土壤水分供应不足条件下, 深层土壤水分可通过作物根系的提水作用释放到表层土壤, 提高浅层根系存活率而保证作物从耕层吸收养分, 但根系的这种提水作用相对有限^[14-15]。方日尧等^[16]研究表明, 在渭北旱原地区将肥料深施至 20 cm 土层以下, 可促进小麦根系向侧深发展, 改善作物水分环境, 从而提高产量。Alston^[17]研究发现, 在表土水分供应不足时, 氮、磷肥深施与表施相比, 小麦根长、水分利用效率、籽粒产量及含磷量显著增加。施磷明显增加施磷土层根长密度, 使根系分布发生改变, 深层施磷显著增加冬小麦深层根长密度和分配比例,

收稿日期: 2013-10-31 修订日期: 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (31270553); 陕西省自然科学基金 (2012JM3010)

作者简介: 康利允 (1981—), 女, 河南安阳人, 博士, 主要从事植物营养方面研究。杨凌 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, 712100。Email: kangliyun2004@126.com

*通信作者: 李世清 (1963—), 博士, 甘肃秦安人, 教授。主要从事植物营养与旱地农业领域的相关研究。杨凌 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, 712100。

Email: sqli@ms.iswc.ac.cn

有利于促进深层土壤根系发育^[18]。在水分胁迫条件下,与表层施磷(5~7 cm)相比,侧深施磷(10~15 cm)使小麦产量显著增加 30%~43%^[19]。Kuhlmann^[20]在汉诺威南部 Loess-parabrown 土壤上的研究表明,春小麦地上部磷含量与 30 cm 以下土层有效磷含量呈正相关。但也有研究者认为,肥料深施对作物很少或根本没有益处^[21-22]或其效果与土壤类型^[23]有关。

有关旱作高产农田生产体系作物磷高效的根际调控研究相对薄弱,而且大都集中在施磷对作物产量和水、磷利用效率等方面,较少考虑根际施肥调控对水、磷高效利用效率的影响。本试验针对黄土高原地区旱地土壤上层干旱下层湿润的特点,以冬小麦为供试材料,研究分层供水施磷是否影响冬小麦根系分布及提高吸磷量、水分利用效率,最终达到增产,旨在找出旱地农业最佳水肥处理方式,为旱地合理施肥提供一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

选择典型旱作农业区,在中国科学院水利部水土保持研究所武农业生态试验站布置田间试验。该试验地位于陕西省长武县洪家镇王东村(35°12' N、107°40'E),海拔 1 220 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温达 9.1℃、降水量 584 mm、无霜期为 171 d,地下水埋深达 50~80 m。土壤为黑垆土,根据系统分类,又称筒育干润均腐土(Hap-Ustic Isohumisol),其母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体均匀疏松、通透性好,是黄土高原沟壑区典型代表性土壤。试验地土壤初始有机质、全氮、有效磷、速效磷和有机氮质量分数分别为 11.5 g/kg、0.78 g/kg、10.6 mg/kg、114.5 mg/kg 和 3.46 mg/kg。试验区 0~200 cm 深度土壤平均田间持水率(体积含水率)为 19%。2010—2011 年试验期间作物生育期降雨和气温见图 1。

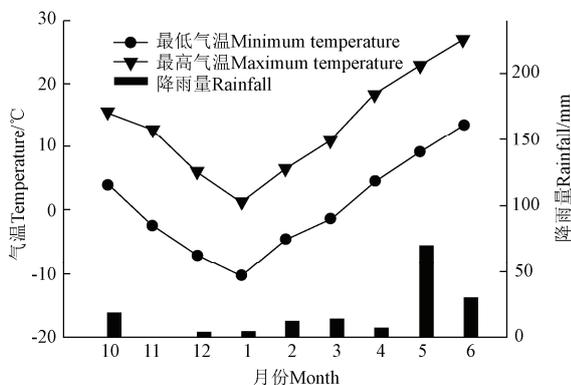


图 1 冬小麦生育期内降雨量和气温分布(2010—2011年)
Fig.1 Monthly temperatures and rainfall during growing period of winter wheat (2010-2011)

1.2 试验设计

试验处理包括土壤水分和施磷 2 个因子。施磷设不施磷(CK)、表施(surface P, SP)、深施(deep P, DP)和侧深施(deep-band P, DBP) 4 种处理;水分设补充灌溉(每次灌溉至田间持水率的 70%~80%,用 W1 表示)和干旱(整个生育期不灌溉,用 W2 表示) 2 个处理。组成完全方案,共 8 个处理组合(表 1),每处理重复 3 次,随机排列。小区面积 3 m×4 m=12 m²,水分处理间隔离带为 3 m。

表施为将磷肥撒施后旋耕于土壤,深施为将 0~<20 cm 土层取出,撒施于 20 cm 处后翻施于 30 cm 处,然后将回填挖出土,侧深施为沟施于 30 cm 土层处;灌溉处理根据小区土壤含水率分别于 2010 年 12 月 14 日、2011 年 4 月 24 日、5 月 8 日和 6 月 3 日进行补充灌溉,每小区灌溉 0.25 m³(相当于灌溉量 20.8 mm),灌溉处理冬小麦全生育期总灌溉量为 83.2 mm。各处理氮肥、磷肥和钾肥作基肥一次性施入,每处理氮、钾肥施用量相同,分别为氮肥(以尿素为氮源)210 kg/hm²和钾肥(以硫酸钾为钾源)75 kg/hm²。试验于 2010 年 9 月 23 日播种,行间距为 20 cm,基本苗为 150 kg/hm²,田间管理同一般田间栽培。

表 1 试验处理组合
Table 1 Treatment combinations for this study

水分 Water	磷肥 Phosphorus/ (kg·hm ⁻²)	施磷深度 Phosphorus depth/cm	施磷方式 Methods of phosphorus application
	0	-	-(CK)
灌溉 Irrigation (W1)	120	0~<20	表施磷(SP)
	120	20~40	深施磷(DP)
	120	20~40	侧深施磷(DBP)
	0	-	-(CK)
干旱 Non-irrigation (W2)	120	0~<20	表施磷(SP)
	120	20~40	深施磷(DP)
	120	20~40	侧深施磷(DBP)

注: W1, 每次灌溉至田间持水率的 70%~80%; W2, 整个生育期不灌溉; 下同。

Note: W1, water content of soil is 70%~80% the content of field holding water after every irrigation; W2, No irrigation during the whole growth period; the same as below.

1.3 样品采集与测定

1) 土壤水分: 每隔 2 d, 0~20 cm 土层用 TDR(时域反射仪, Time domain reflectometry, 美国 MEGGER, TDR1000/2)、烘干法准确测定土壤含水率,根据含水率和设计水分要求,计算灌溉量。于播前、收获后每小区用土钻采集 0~200 cm 土层土样,每 20 cm 作为一个采样层次,然后在 105℃ 烘 24 h 至恒质量,称干质量。

2) 植物样品: 在小麦成熟后,每小区随机按播种行选取 4 行,用以计算小麦籽粒产量,并每小

区随机按行选取 2 个 1 m 长的样段, 连根拔起后剪去根部, 剩余部分测定有效分蘖数、穗粒数、千粒质量、籽粒产量及计算收获指数。同时, 孕穗期每小区随机按行选取 2 个 1 m 长的样段, 用以计算小麦生物量及吸磷量。小麦生物量和籽粒产量均以 75℃ 烘干至恒质量。孕穗期植株样品粉碎后, 用浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 钼锑抗比色法定全磷含量^[24]。由于冬小麦对磷素的吸收利用主要在苗期, 因而本文根据冬小麦孕穗期样品磷含量及生物量仅计算孕穗期吸磷量。水分利用效率 (water use efficiency, WUE, $kg/(hm^2 \cdot mm)$) 为作物籽粒产量 (kg/hm^2) 和耗水量 (mm) 的比值。

3) 根系观测: 孕穗期, 用自制活动式可调根钻 (内径 10 cm) 在行间和行上各打 1 钻, 合并土样后进行分析, 将土样置于容器中, 浸泡 10~20 h 后, 冲洗泥土并用 0.15 mm 网筛过滤, 洗净并剔除杂质和死根。收集到的根样用 EPSON Perfection 4870 Scanner 扫描仪双面光源扫描后, 将完整根系图像存入计算机, 再用加拿大产 WinRHIZO Pro (Version 2004a) 根系分析程序获得根长 (cm)。

1.4 数据分析

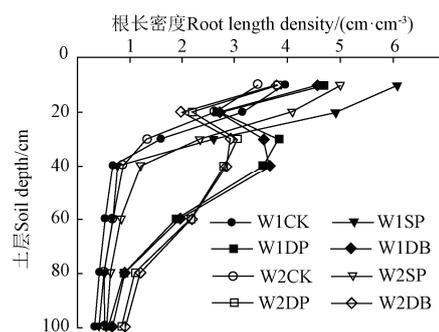
采用 Excel 2003、SPSS 13.0、Sigmaplot 10.0 数据分析软件对数据进行作图、方差分析, 并采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根长密度的影响

根长密度是研究作物根系的重要指标之一, 能较好地说明根系在土体中的分布。不同水分条件下分层施磷显著 ($P<0.05$) 影响冬小麦孕穗期根长密度在土壤剖面上的空间分布 (图 2)。随土壤深度的增加根长密度递减。从不同水分处理看, 与 W1 处理相比, W2 处理 0~<30 cm 土层根长密度显著降低了 17.5% ($P<0.05$), 而 30~100 cm 土层根长密度却显著增加了 13.3% ($P<0.05$), 说明干旱胁迫抑制了冬小麦表层根系伸长, 却有利于深层根系生长发育。从不同施磷方式看, 2 种水分条件下, 施磷处理 (SP、DP 和 DBP) 0~<30 cm 土层根长密度均显著高于 CK ($P<0.05$), 平均增加 34.6%, 且表层施磷处理 (SP) 也显著高于深层施磷处理 (DP 和 DBP) ($P<0.05$), 平均增加 25.8%, 说明表层施磷会促进土壤表层根系生长, 冬小麦根系趋于表层分布; 30~100 cm 土层根长密度 DP 和 DBP 均较 CK 和 SP 高 ($P<0.05$), 平均增加 161.5%, 说明深层施磷有利于冬小麦根系下扎, 促进深层根系生长发育。

Barraclough^[25]早在 1989 年就提出, 当土壤中根长密度小于 $0.8\sim 1.0\text{ cm/cm}^3$ 时, 根系的不足是限制作物充分利用土壤水分和养分的主要因素。无补充灌溉条件下, 大田试验中磷肥深施处理根长密度在 60~<80 cm 土层达到 $1.43\sim 1.46\text{ cm/cm}^3$ (图 2), 在 80~100 cm 土层为 $0.83\sim 0.90\text{ cm/cm}^3$, 应该说在 100 cm 土层内根长密度还在 0.8 cm/cm^3 以上, 这对吸收深层土壤水分及养分极为有利; 而磷肥表施的根长密度在 60~<80 cm 处为 0.66 cm/cm^3 , 显然深层根系的不足会限制作物对深层土壤水分、养分的吸收利用能力。



注: W1CK, 灌溉不施磷; W1SP, 灌溉表层施磷; W1DP, 灌溉深层施磷; W1DBP, 灌溉侧深施磷; W2CK, 旱作不施磷; W2SP, 旱作表层施磷; W2DP, 旱作深层施磷; W2DBP, 旱作侧深施磷; 下同。

Note: W1CK, Irrigation and no P; W1SP, Irrigation and surface P; W1DP, Irrigation and deep P; W1DBP, Irrigation and deep-band P; W2CK, drought and no P; W2SP, drought and surface P; W2DP, drought and deep P; W2DBP, drought and deep-band P; Same as below.

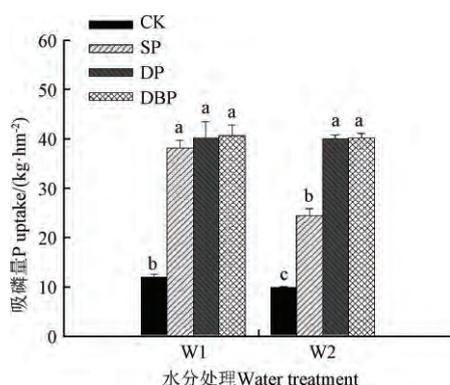
图 2 不同水分条件下分层施磷对冬小麦孕穗期各土层根长密度的影响

Fig.2 Effects of phosphorus application at different soil depth on root length density of winter wheat under different water conditions

2.2 不同水分条件下分层施磷对冬小麦植株吸磷量的影响

不同水分条件下分层施磷对冬小麦孕穗期植株吸磷量的影响见图 3。从不同水分处理看, 与 W1 处理相比, W2 处理冬小麦植株吸磷量 (DP、DBP 除外) 显著降低 ($P<0.05$), 平均降低 31.7%。无论是否补充灌溉, 施磷处理 (SP、DP 和 DBP) 冬小麦植株吸磷量均显著高于 CK ($P<0.05$), 平均增加 250.4%。施磷位置对冬小麦植株吸磷量的影响随土壤水分而异, W1 处理下, 磷肥深施 (DP 和 DBP) 与表施 (SP) 处理间植株吸磷量差异未达 5% 显著水平; W2 处理下, 与 SP 相比, DP 和 DBP 均显著增加 ($P<0.05$), 平均增加 64.2%, 说明无补充灌溉时, 深层施磷更有利于促进冬小麦对土壤磷素的吸收利用。由图 2 和图 3 还可以看出, W2 处理下, 孕穗期深层 (30~100 cm) 根长密度与孕穗期植株吸磷量的变化趋势一致, 表明增加深层土壤

根长密度是提高植株吸磷量的关键因素，而 W1 处理下，则缺乏规律性。



注：W1，灌溉；W2，旱作；CK，不施磷；SP，表层施磷；DP，深层施磷；DBP，侧深施磷。图中的竖线表示标准误，同一水分处理内不同字母表示差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$)；下同。

Note: W1, Irrigation; W2, drought; CK, no P; SP, surface P; DP, deep P; DBP, deep-band P. the different letter in the same water treatment means significant difference ($P < 0.05$); Same as below.

图 3 不同水分条件下分层施磷对冬小麦孕穗期植株吸磷量的影响

Fig.3 Effects of P application in different soil depth on P uptake at booting stage of winter wheat under different water conditions

2.3 不同水分条件下分层施磷对冬小麦水分利用效率的影响

由图 4 可见，不同水磷处理冬小麦全生育期水分利用效率存在显著差异。从不同水分处理看，与 W1 处理相比，W2 处理水分利用效率均显著提高 ($P < 0.05$)，平均增加 86.7%，表明无补充灌溉有利于促进冬小麦对土壤水分的吸收利用，从而提高了水分利用效率。2 种水分条件下，施磷处理 (SP、DP 和 DBP) 水分利用效率均显著高于 CK ($P < 0.05$)，平均增加 40.4%。磷肥施用位置对冬小麦水分利用效率的影响随土壤水分而异，W1 处理下，与 SP 相比，DP 和 DBP 处理水分利用效率均显著降低 ($P < 0.05$)，平均降低 13.3%；W2 处理

下，与 SP 相比，DP 和 DBP 处理水分利用效率均显著增加 ($P < 0.05$)，平均增加了 28.5%，表明在旱作农田无补充灌溉时磷肥深施更有利于提高冬小麦水分利用效率。由图 2 和图 4 还可以看出，W2 条件下，随孕穗期深层 (30~100 cm) 根长的增加，水分利用效率也明显提高，深层根长与水分利用效率的变化趋势基本一致，而在 W1 处理下则无此规律，表明无补充灌溉时冬小麦深层根长的增加有利于促进对土壤水分的吸收利用能力，从而提高水分利用效率。

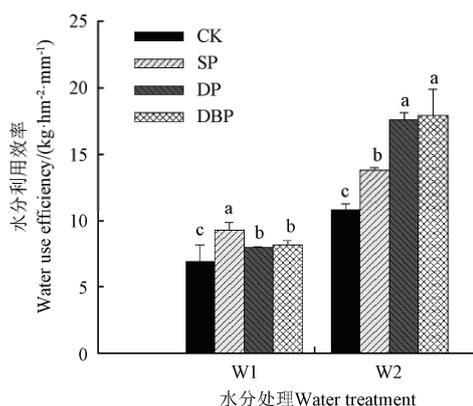


图 4 大田试验不同水分条件下分层施磷对冬小麦水分利用效率的影响

Fig. 4 Effects of P application in different soil depth on water use efficiency of winter wheat under different water conditions

2.4 不同水分条件下分层施磷对冬小麦产量及收获指数的影响

2.4.1 不同水分条件下分层施磷对冬小麦产量及产量构成因素的影响

有效分蘖数、穗粒数、千粒质量是小麦重要农艺性状，也直接影响着小麦产量的高低及收获指数。不同水分条件下分层施磷对冬小麦产量及产量构成因素的影响见表 2。不同水分处理间有效分蘖数、穗粒数、千粒质量及产量均未达到 5% 显著水平。

表 2 不同水分条件下分层施磷对冬小麦产量、产量构成因素及收获指数的影响

Table 2 Grain yield, yield components and harvest index (HI) of winter wheat under different water and phosphorus treatments

处理 Treatment	有效分蘖数 Productive tillers per plant	穗粒数 Kernels per spike	千粒质量 1000-kernel weight/g	产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index
W1CK	1.58 b	29.7 a	47.7 a	3925.1 b	0.32 b
W1SP	2.14 a	34.8 a	47.3 a	5637.1 a	0.32 b
W1DP	2.01 a	29.7 a	48.2 a	5258.9 a	0.35 a
W1DBP	2.02 a	29.9 a	47.5 a	5170.8 a	0.35 a
W2CK	1.50 b	27.5 a	47.8 a	3892.8 c	0.36 a
W2SP	2.02 a	28.3 a	48.3 a	4975.8 b	0.32 b
W2DP	2.21 a	29.5 a	49.1 a	5763.1 a	0.37 a
W2DBP	2.25 a	29.1 a	49.1 a	5784.3 a	0.37 a

注：同一列同一水分处理不同字母表示差异达 5% 显著水平；下同。

Note: Data in same column and water treatment with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$); Same as below.

施磷显著影响除千粒质量和穗粒数外的其他产量构成因素及产量 ($P < 0.05$) (表 2)。2 种水分条件下, 施磷处理 (SP、DP、DBP) 产量显著高于 CK ($P < 0.05$), 平均增加 39.0%。磷肥施用位置对冬小麦产量的影响随土壤水分而异, W1 条件下, 深层施磷处理 (DP 和 DBP) 产量与表层施磷处理 (SP) 间差异不显著 ($P > 0.05$); 而 W2 条件下, 产量则显著增加 ($P < 0.05$), 平均增产 16.0%, 说明无补充灌溉时磷肥深施对冬小麦产量形成具有明显促进作用。无论是否补充灌溉, 磷肥施用深度对冬小麦穗粒数、千粒质量的影响均无显著差异 ($P > 0.05$)。由图 2 和表 2 还可以看出, W2 条件下, 孕穗期深层 (30~100 cm) 根长与产量的变化趋势一致, 表明旱作农田无补充灌溉通过增加冬小麦深层土壤根长而提高产量, 而 W1 条件下, 则缺乏规律性。

2.4.2 不同水分条件下分层施磷对冬小麦收获指数的影响

收获指数 (Harvest index, HI) 指收获的穗部籽粒产量与地上部干物质量之比^[26], 它与作物光合同化能力及器官的发育建成有关, 反映了有效同化物向籽粒的分配效率, 是重要的生物学参数之一。小麦育种已经从长期强调籽粒产量, 发展到关注收获指数^[27-28]。不同水磷处理 HI 变化在 0.32~0.37, 差异较大 (表 2), 表明冬小麦收获指数稳定性不高, 易受水肥条件影响。从不同水分处理看, W1 与 W2 处理收获指数差异不显著 ($P > 0.05$)。2 种水分条件下, 与磷肥表施相比 (SP), 磷肥深施处理 (DP 和 DBP) HI 均显著增加, 分别平均增加 7.71% 和 14.9%, 表明磷肥深施有利于提高冬小麦收获指数, 无补充灌溉时效果更为明显。

3 讨论

本研究结果表明, 在旱作农业中通过更好的磷肥管理措施冬小麦依然有可能获得高产。以前的室内隔层土柱模拟试验结果表明, 在上层土壤干旱 (0~<30 cm, 土壤含水率为田间持水率的 40%~45%) 下层土壤湿润 (30~60 cm, 土壤含水率为田间最大持水率的 70%~80%) 条件下, 磷肥深施 (30~60 cm) 使上层根系生物量 (0~<30 cm) 减少, 而使深层根系生物量 (30~60 cm) 显著增加, 改变根系分布模式, 深层根系的增加有利于对深层储水的充分利用, 从而提高水分利用率及产量, 同时, 深层根系与产量密切相关, 深层根量越多, 产量越高, 而在整体湿润 (0~60 cm, 土壤含水率为田间持水率的 70%~80%) 条件下则无上述规律^[29]。前人研究结果也认为, 深层根系是旱地作物形成籽

粒产量的功能根系, 深层根系的不足会限制作物对深层土壤水分和养分的吸收利用能力, 从而降低水分、养分利用率, 不利于形成高产^[30-31]。本田间试验结果表明, 旱作农业无补充灌溉时会显著 ($P < 0.05$) 降低表层 (<30 cm) 根长, 平均降低 17.5%, 而显著 ($P < 0.05$) 增加深层 (≥ 30 cm) 根长, 平均增加 13.3%。从不同施磷方式看, 无论灌溉与否, 深层施磷均会显著增加小麦深层 (>30 cm) 根长, 说明旱地农田磷肥深施促进冬小麦深层根系生长发育, 有利于吸收更多的土壤水分和养分, 尤其是在无补充灌溉时效果更为显著。

在澳大利亚北部旱作农业区进行的试验表明, 与磷肥表施 (5~7 cm) 相比, 磷肥深施 (10~15 cm) 显著增加了春小麦地上部生长和籽粒产量^[19]。Lotfollahi 等^[32]利用盆栽试验研究表明, 小麦开花后 2 周深层土壤 (60 cm) 增施氮肥会大大提高小麦籽粒产量和蛋白质含量及根系生长和水分利用效率, 并且认为深层施氮增加根长密度是提高小麦对深层氮素高效吸收利用的主要因素。Jarvis 等^[13]认为深层施磷可促进小麦和羽扇豆对磷素的吸收利用。Wang 等^[33]利用土柱试验研究表明, 尽管棉花通过“根系提水作用”将深层土壤水分释放到干旱的表层土壤, 根系从干旱表层土壤里吸收利用的磷几乎可以忽略不计。本研究表明, 无补充灌溉条件下, 磷肥深施显著增加冬小麦植株吸磷量、水分利用效率及产量 (图 3, 4 和表 2), 且深层根长 (30~100 cm) 与植株吸磷量、水分利用效率及产量的变化趋势一致, 即增加深层土壤根长是提高植株吸磷量、水分利用效率及产量的关键因素, 而在补充灌溉条件下则缺乏规律性, 表明, 土壤水分供应不足时冬小麦深层土壤根系与植株吸磷量、水分利用效率及产量密切相关, 即深层土壤根长的增加促进作物对土壤水分和养分的吸收, 易于形成高产, 深层土壤根长不足是限制作物高产的关键因素。

干物质生产和分配是产量形成的重要因素, 适当减少表层土壤根长密度, 在一定程度上降低了根系冗余^[34], 光合同化产物向根系的分配比例减少^[35], 从而有利于增产。笔者和其他许多研究^[13-14, 18]发现, 在上层土壤水分供应不足时深层土壤根长密度增加是根系向水性的典型反应。因此, 对旱地作物而言, 上层根系的适当减少及深层根系的增加有利于促进作物对土壤水分和养分的充分吸收, 提高水分、养分利用率及产量, 而磷肥深施有利于实现这一目标。与深层施磷相比, 侧深施磷对冬小麦生长或籽粒产量无显著提高, 考虑到实际可行性, 农业生产选择侧深施肥。

4 结 论

磷肥施用位置对冬小麦产量及收获指数的影响随土壤水分而异。土壤水分供应充足时, 磷肥深施不利于提高冬小麦产量; 而在土壤水分供应不足时, 磷肥深施对提高冬小麦产量及收获指数非常有效, 平均分别增加 16.0% 和 14.9%。

2 种水分条件下, 与磷肥表施和 CK 相比, 磷肥深施显著 ($P < 0.05$) 增加 30~100 cm 土层根长密度, 平均增加 161.5%, 表明磷肥深施有利于促进冬小麦深层土壤根系生长发育, 提高对土壤水分和磷素的吸收利用能力, 从而形成高产。旱作农业中, 上层土壤根系的适当减少及深层根系的增加对充分利用深层土壤储水和养分具有重要作用, 从而有利于提高水分、养分利用效率及产量, 而磷肥深施有利于实现这一目标。侧深施磷与深层施磷对冬小麦生长或籽粒产量有相似的作用, 考虑到实际可行性, 农业生产选择侧深施肥。

本研究立足黄土高原旱作农业土壤“上干下湿, 上肥下瘦”的特点, 研究不同水分状况下磷肥施用位置对冬小麦根长、产量及水分利用率的影响, 基本明确了实现旱作农业高产高效的最佳施肥位置, 对指导旱作农业合理施肥提供一定的理论和实践意义。但今后的研究中还有很多方面值得关注:

1) 不同土层水肥处理的水肥空间耦合效应明显, 显著影响了冬小麦的籽粒产量, 因此, 与生产实际结合, 可以在此基础上进行水肥时间耦合效应研究, 即在不同土层水肥交错基础上, 分不同生育时期的水分胁迫、养分胁迫, 来进一步讨论不同层次、不同时期水肥处理对籽粒产量的影响, 并加强对小麦品质及生态环境的研究。

2) 由于土壤自身氮磷供应能力不同, 可显著影响氮磷肥料的增产效应和肥料利用率, 因此, 可以对不同肥力土壤和不同施肥水平进行研究, 分析耦合效应, 建立包括土壤基础养分供应因子在内的水肥耦合模型。

[参 考 文 献]

- [1] Yin Xinhua, Vyn T J. Soybean responses to potassium placement and tillage alternatives following no-till[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(6): 1367—1374.
- [2] Mallarino A P, Borges R. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 702—707.
- [3] Ma Q, Rengel Z, Rose T. The effectiveness of deep placement of fertilisers is determined by crop species and edaphic conditions in Mediterranean-type environments:

- A review[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47(1): 19—32.
- [4] 李晓林, 陈新平, 崔俊霞, 等. 不同水分条件下表层施磷对小麦吸收下层土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 40—46.
Li Xiaolin, Chen Xinping, Cui Junxia, et al. Uptake of nutrients from subsoil by wheat as affected P supply under different soil moistures[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2): 40—46. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3672—3678.
Shao Guoqing, Li Zengjia, Ning Tangyuan, et al. Effects of irrigation and urea types on N utilization, yield and quality of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3672—3678. (in Chinese with English abstract)
- [6] Borges R, Mallarino A P. Broadcast and deep-band placement of phosphorus and potassium for soybean managed with ridge tillage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1920—1927.
- [7] Fernández F G, Brouder S M, Beyrouy C A, et al. Assessment of plant-available potassium for no-till, rainfed soybean[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 72(4): 1085—1095.
- [8] He Y Q, Zhu Y G, Smith S E, et al. Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(4): 913—925.
- [9] Fernández F G, Brouder S M, Volenec J J, et al. Root and shoot growth, seed composition, and yield components of no-till rainfed soybean under variable potassium[J]. *Plant and Soil*, 2009, 322(1/2): 125—138.
- [10] 李凤民, 鄢珣, 郭安红, 等. 试论麦类作物非水力根信号与生活史对策[J]. *生态学报*, 2000, 20(3): 510—513.
Li Fengmin, Yan Xun, Guo Anhong, et al. A discussion on the non-hydraulic root-sourced signals and life history strategy of wheat crops[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 510—513. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张永清, 苗果园. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 72—75.
Zhang Yongqing, Miao Guoyuan. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [12] Grewal H S, Graham R D. Residual effects of subsoil zinc and oilseed rape genotype on the grain yield and distribution of zinc in wheat[J]. *Plant and Soil*, 1999, 207(1): 29—36.
- [13] Jarvis R J, Bolland M D A. Placing superphosphate at different depths in the soil changes its effectiveness for wheat and lupin production[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 22(2): 97—107.

- [14] 张扬, 沈玉芳, 李世清. 施肥对干旱胁迫下夏玉米根系提水的调节作用研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 535—541.
Zhang Yang, Shen Yufang, Li Shiqing. Regulation of different fertilizer treatments on hydraulic lift of summer maize under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali—Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 535—541. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bauerle T L, Richards J H, Smart D R, et al. Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(2): 177—186.
- [16] 方日尧, 赵惠青, 同延安. 渭北旱原冬小麦深施肥沟播综合效应研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 49—52.
Fang Riyao, Zhao Huiqing, Tong Yan'an. Research on integrated effect deep application of fertilizer and furrow-sowing winter wheat on Weibei rainfed highland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2000, 16(1): 49—52. (in Chinese with English abstract)
- [17] Alston A M. Effects of depth of fertilizer placement on wheat grown under three water regimes[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1976, 27(1): 1—10.
- [18] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 开发利用土壤深层水资源的一种有效途径——“以肥调水”的大田试验研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 423—429.
Liu Gengshan, Guo Anhong, An Shunqing, et al. A scientific approach of using water resources in deep soil layer-farmland experimental studies of utilizing water by fertilizer[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 423—429. (in Chinese with English abstract)
- [19] Singh D K, Sale P W G, Routley R R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: Rationale for deep placement and the effects with various crops[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 35—44.
- [20] Kuhlmann H. Importance of the subsoil for the K nutrition of crops[J]. *Plant and Soil*, 1990, 127(1): 129—136.
- [21] Bolland M D A, Jarvis R J. Effectiveness of different methods of applying superphosphate for lupins grown on sandplain soils[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1996, 36: 707—715
- [22] Vyn T J, Galic D M, Janovicek K J. Corn response to potassium placement in conservation tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67(2): 159—169.
- [23] Adjetej J A, Campbell L C, Searle P G E, et al. Studies on depth of placement of urea on nitrogen recovery in wheat grown on a red-brown earth in Australia[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3): 227—232.
- [24] 史瑞和. 土壤农化分析: 2版[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 216—218.
Shi Ruihe. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*: 2rd edition [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988: 216—218. (in Chinese)
- [25] Barraclough P B. Root growth, macro—nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop[J]. *Plant and Soil*, 1989, 119(1): 59—70.
- [26] 李开峰, 张富仓, 祁有玲, 等. 根区水肥空间耦合对冬小麦生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3154—3160.
Li Kaifeng, Zhang Fucang, Qi Youling, et al. Effects of water-fertilizer spatial coupling in root zone on winter wheat growth and yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3154—3160. (in Chinese with English abstract)
- [27] Margarital, Himmelbauer, Willibald L, et al. Spatial root distribution and water uptake of maize grown on field with subsoil compaction[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2010, 58(3): 163—174.
- [28] 孟晓瑜, 王朝辉, 杨宁, 等. 底墒和磷肥对渭北旱塬冬小麦产量与水、肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1083—1090.
Meng Xiaoyu, Wang Zhaohui, Yang Ning, et al. Effects of soil moisture before sowing and phosphorus fertilization on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiencies on Weibei Tableland of the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1083—1090. (in Chinese with English abstract)
- [29] 康利允, 李世清. 分层供水施磷对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1): 85—92.
Kang Liyun, Li Shiqing. Influence of water supply and phosphorus application in different depth on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1): 85—92. (in Chinese with English abstract)
- [30] Asseng S, Ritchie J T, Smucker A J M, et al. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2): 265—273.
- [31] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 258—264.
Liang Yinli. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root system growth of wheat and water use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 258—264. (in Chinese with English abstract)
- [32] Lotfollahi M, Alston A M, McDonald G K. Effect of nitrogen fertiliser placement on grain protein concentration of wheat under different water regimes[J]. *Australia Journal of Agriculture Research*, 1997, 48(2): 241—250.
- [33] Wang X, Tang C, Guppy C N, et al. The role of hydraulic lift and subsoil P placement in P uptake of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. *Plant and Soil*, 2009, 325(1/2): 263—275.
- [34] 李话, 张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1):

26—30.

Li Hua, Zhang Dayong. Morphological characteristics and growth redundancy of spring wheat root system in semi-arid regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 26—30. (in Chinese with English abstract)

[35] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植

株干物质积累及磷效率的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5578—5587.

Qiao Zhenjiang, Cai Kunzheng, Luo Shiming. Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5578—5587.

Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions

Kang Liyun^{1, 2}, Shen Yufang¹, Yue Shanchao¹, Li Shiqing^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to find out the best water-phosphorus (P) application method in improving grain yield and water use efficiency of winter wheat grown on the semi-arid Loess Plateau of China, this study evaluated the effects of phosphorus application at different soil depths on root length distribution, water use efficiency and grain yield of winter wheat under different water condition and analyzed the relationship between root distribution and grain yield. The experiment consisted of four P treatments and two water treatments in a randomized complete block design with three replicates. The four phosphorus levels included no P (CK), surface P (SP), deep P (DP) and deep band P (DBP) and the two water treatments were irrigation (W1) and no irrigation (W2) in the whole growth period of winter wheat. The results showed that there was large difference in root length distribution, water use efficiency and grain yield of winter wheat among different treatments. Compared with the irrigation treatment, the non-irrigation treatment significantly ($P<0.05$) lowered the surface soil root length (0-30 cm) by 17.5%, but significantly increased ($P<0.05$) deep soil root length (30-100 cm) by 13.3%, which would be helpful in promoting the absorption of soil water and P, water use efficiency and grain yield. Root length density was increased at the site of placement where P was applied under the two water treatments, particularly under water stress. Whether irrigation or not, P application (SP, DP and DBP) caused the increase of P uptake amount, water use efficiency and grain yield, compared with the CK treatment. The effect of P placement on water use efficiency and grain yield of winter wheat was different. Deep P application (DP and DBP) significantly ($P<0.05$) decreased water use efficiency of winter wheat compared with SP by 13.3%, while significantly ($P<0.05$) increased water use efficiency and grain yield under non-irrigation treatment by 28.5% and 16.0%, respectively. Furthermore, root length in deep soil layer (30-100 cm) was positively correlated with P uptake amount, grain yield and water use efficiency under non-irrigation condition, that is, the longer deep soil root length, the better water use efficiency and higher production under soil drought condition. No correlation was found between root length in deep soil layer (30-100 cm) and P uptake amount, grain yield and water use efficiency under irrigation condition, highlighting the importance of well-developed subsoil root system for both high grain yield and water use efficiency. The study suggested that deep placement of fertilizer phosphorus was a practical and feasible method of increasing grain yield and water use efficiency under water stress conditions by promoting deep root development.

Key words: fertilizers; irrigation; moisture; phosphorus application in different soil depth; root length distribution; water use efficiency; yield