

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025

调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响

孟兆江^{1,2} 段爱旺^{1,2} 高 阳^{1,2} 王晓森^{1,2} 申孝军^{1,2} 常 晓^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453002)

摘要: 为研究调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响,采用防雨棚下盆栽方法,于2012—2013年和2013—2014年在黄淮海平原河南新乡连续进行了2 a 试验研究。冬小麦设置5个水分调亏阶段:三叶—越冬(I)、越冬—返青(II)、返青—拔节(III)、拔节—抽穗(IV)、抽穗—成熟(V);每个生育阶段设置3个水分调亏度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),相对含水率(占田间持水量的百分数)分别为60%~65% FC(田间持水量)、50%~55% FC和40%~45% FC;对照(CK)相对含水率为75%~85% FC。结果表明,越冬—返青的轻度(60%~65% FC)或中度(50%~55% FC)水分调亏复水后有利于氮、磷养分向籽粒运转与分配,而水分过多或过度亏水则导致养分过多分配至茎、叶等营养器官;抽穗—成熟期的适度调亏(50%~55% FC)有利于提高籽粒中氮、磷的含量,因而提高籽粒产量,改善籽粒品质;返青—拔节及其以前阶段的轻度(60%~65% FC)、中度(50%~55% FC)水分调亏有利于提高氮、磷养分利用效率,但水分调亏不利于钾素利用效率的提高。水分调亏,尤其是越冬期的轻度调亏(60%~65% FC)或拔节期的中度水分调亏(50%~55% FC)可显著增强作物对土壤氮素的吸收利用能力,从而减少肥料氮在土壤中的残留量。说明 RDI 可有效调控作物养分吸收与分配,实现节水、节肥、高产、优质和高效目标。

关键词: 冬小麦; 灌溉; 调亏灌溉; 养分吸收; 养分利用效率

中图分类号: S275; S512.1; Q945.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0203-10

Effect of Regulated Deficit Irrigation on Uptake and Utilization of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for Winter Wheat

Meng Zhaojiang^{1,2} Duan Aiwang^{1,2} Gao Yang^{1,2} Wang Xiaosen^{1,2} Shen Xiaojun^{1,2} Chang Xiao^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

2. Key and Open Laboratory of Crop Water Requirements Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China)

Abstract: A better understanding of the effects of irrigation model on soil nutrients is important to agronomists and farmers for developing management packages with high-yield, good-quality and low water and fertilizer applications. A pot-based experiment with winter wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.) was conducted under rainproof shelter during the growing seasons of 2012—2013 and 2013—2014 to investigate the effects of regulated deficit irrigation (RDI) on nitrogen, phosphorus and potassium uptake and utilizations in Xinxiang City of Henan Province, in the Huang-Huai-Hai Plain of China. The experimental treatments included five growth stages (I, three leaves-winter; II, winter-beginning of spring growth; III, beginning of spring growth-stem elongation; IV, stem elongation-ear emergence and V, ear emergence-maturity) and three levels of water deficit (60%~65% FC (field capacity), 50%~55% FC, and 40%~45% FC for light, moderate, and severe deficit, respectively) were laid out in a randomised complete block design with three replicates. A non-deficit control (CK) (75%~85% FC

收稿日期: 2016-04-21 修回日期: 2016-07-12
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51079153)、国家现代农业小麦产业技术体系专项经费项目(CARS-3-1-30)、河南省科技攻关项目(科技攻关-2015)、国家自然科学基金青年基金项目(51309227)、中国农业科学院科技创新工程项目和河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站观测研究及数据信息系统建设项目
作者简介: 孟兆江(1958—),男,研究员,博士,主要从事作物高效用水和作物水肥耦合研究,E-mail: zhaojiang_meng@aliyun.com

from sowing to maturity) with three replications was also included. The results indicated that light or moderate water deficit at winter-beginning of spring growth stage benefited nutrients translocation and distribution in the grains, and excess of water in the soil or inapplicable water deficit resulted in increase of proportion of nutrients accumulation in vegetative organs. Appropriate water deficit (50% ~55% FC) during ear emergence-filling stage was able to increase nitrogen and phosphorus contents in grains, and then increase grain yield and improve quality. Light water deficit or moderate water deficit during beginning of spring growth-stem elongation stage was favorable to improve nitrogen and phosphorus use efficiencies, but water deficit at any stages was unfavorable to increase potassium use efficiency. The results also showed that appropriate water deficit (especially light water deficit at winter stage or moderate water deficit at stem elongation stage) significantly enhanced nitrogen absorption ability of plants from soil, and reduced nitrogen residue in soil. Therefore, it was suggested that RDI can effectively regulate nitrogen, phosphorus and potassium uptake, and promote water and fertilizer savings, high yield, good quality and high efficiency of winter wheat.

Key words: winter wheat; irrigation; regulated deficit irrigation; nutrients uptake; nutrient use efficiency

引言

黄淮海平原是我国重要的冬小麦主产区之一,其产量占全国小麦产量的70%以上^[1]。但是,由于该区水资源严重短缺,同时小麦生育期间降雨量不能满足其生长发育需求,在小麦生长期的某些阶段遭遇水分亏缺是不可避免的。因此,要持续获得冬小麦高产、稳产和优质,必须进行补充灌溉。然而,水分亏缺程度和补充灌溉时间影响小麦生长发育、产量品质形成和养分吸收以及矿质养分在土壤中的残留量^[2]。

氮、磷、钾是作物必需的大量矿质营养元素,对小麦的生理生化过程和机体建成起着决定性的调控作用,不但调节籽粒产量的形成,而且对小麦籽粒品质性状有较大的影响。在土壤中,水分与养分之间具有明显的交互作用^[3],水分可增加养分的有效性^[4],也影响作物生长及养分的吸收、转运、转化和同化^[5-7],而养分可以提高水分利用效率^[8]。不论是灌溉农田还是雨养农田,水分和养分一直是作物产量的主要影响因子。

水分供应状况对作物生长和养分吸收的影响已有不少报道^[9-15]。金柯等^[16]研究表明,欠水年土壤水分很低的情况下,协调水分和养分供应,冬小麦也能获得较高产量。赵炳梓等^[17-20]发现,低灌水量条件下,小麦氮、磷、钾的吸收量随施氮量增加而升高,灌水量过高反而降低作物对养分的吸收。但这些研究所揭示的多是某一生长阶段、生育时期或降水气候年型水分对作物生长和养分吸收的效应。调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)对作物氮、磷、钾吸收的影响报道较少。本文采用盆栽模拟试

验,对这一问题进行探讨,旨在了解不同生育阶段和不同水分调亏度组合对作物氮、磷、钾吸收与分配特征的调控作用,为RDI与营养调节优化组合提供理论依据与技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于2012年10月—2013年6月和2013年10月—2014年6月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场大型启闭式防雨棚下进行。试验场位于黄淮海平原河南省新乡市东北郊,东经113°53'、北纬35°19',属典型的暖温带半湿润半干旱地区。年平均降水量580 mm;年平均气温13.5℃;大于等于0℃积温年均均为5 070℃;年日照时数2 497 h;无霜期220 d;年潜在蒸散量2 000 mm。试验用土壤类型为潮土,质地为轻砂壤土,pH值为8.8,基础养分含量为:有机质18.85 g/kg,全氮1.10 g/kg,全磷2.22 g/kg,全钾19.80 g/kg,碱解氮15.61 mg/kg,速效磷72.00 mg/kg,速效钾101 mg/kg(均为质量比);土壤容重为1.25 g/cm³;田间持水量为24%(质量含水率)。

1.2 试验材料

以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)为试验材料,品种为豫麦49,由河南省农业科学院小麦研究所提供。采用盆栽土培法,盆为圆柱形,分内、外盆,内盆内径29.5 cm、高38 cm;盆底部铺5 cm厚的砂过滤层,以调节下层土壤通气状况和水分条件;外盆内径31.0 cm、高38 cm,埋入土中,上沿高出地面5.0 cm。为防止土壤表面水分过量蒸发和土壤板结,内盆两侧各置放直径3 cm的PVC细管用于供水(细管周

围有小孔,以密质纱网包裹以防堵塞)。取大田 0 ~ 20 cm 表土,过筛装盆,各内盆装干土质量 26 kg。每盆混入优质农家肥 7.69 g/kg,全生育期施 N 0.22 g/kg, P₂O₅ 0.11 g/kg, K₂O 0.16 g/kg;分别相当于农家肥 17 302.5 kg/hm², N 495 kg/hm², P₂O₅ 247.5 kg/hm², K₂O 360 kg/hm²;其中氮肥 1/2 基施,1/2 追施;磷、钾肥全部基施。精选种子,于 10 月 16 日播种,每盆 30 粒,出苗后至三叶期定苗,每盆留苗 23 株,开始水分处理。

1.3 试验设计

采用二因素随机区组设计,设置 5 个水分调亏阶段:三叶—越冬(Ⅰ)、越冬—返青(Ⅱ)、返青—拔节(Ⅲ)、拔节—抽穗(Ⅳ)、抽穗—成熟(Ⅴ);每个生育阶段设置 3 个水分调亏度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),相对含水率(占田间持水量的百分数)分别为 60% ~ 65% FC(Field capacity)、50% ~ 55% FC 和 40% ~ 45% FC;设对照(CK)1 个,相对含水率为 75% ~ 85% FC;共 20 个处理,每个处理重复 3 次。水分调亏阶段灌水按处理设计水平(低于下限灌至上限),其余阶段按对照水平(75% ~ 85% FC)控制水分。用电子磅秤称量法测定土壤含水率,用水量平衡法确定蒸散量,每天或隔天称量,当盆内土壤水分低于设计标准时用量杯加水,记录每次加水量,由水量平衡方程计算各阶段耗水量。试验共用内、外盆各 60 只,内盆置于外盆内,便于称量而不粘泥土。

1.4 取样方法

1.4.1 植物样品

在收获前,沿土表将小麦地上部分剪下,自穗与茎秆交接处剪断,分为茎叶和穗两部分,分别装入样品袋,标记封口,带回实验室,放入干燥箱,在 105℃、鼓风条件下干燥 30 min,然后降温至 75℃干燥至质量恒定;将麦穗脱粒,并将颖、芒归入茎叶部分,分别称量茎叶(含颖芒)、籽粒的干质量后,粉碎过筛。

1.4.2 土壤样品

在小麦收获前,用微型土钻(总长 100 cm,钻头长 20 cm、外径 2.2 cm、内径 1.8 cm)在小麦棵间自土表到盆底采取土样,每盆 4 个样点,混合后作为 1 个分析样品(质量约 1 kg)。土样在遮光、室温条件下风干后,用 1.0 mol/L 的 KCl 浸提,浸提液中的氮含量用连续流动分析仪(Continuous flow analysis)测定。

1.5 测定项目及方法

植物样品用 H₂SO₄-H₂O₂法消解^[18],测定各器官的氮、磷、钾含量。采用凯氏定氮法测定样品全氮

含量;钼锑抗比色法测定全磷(以 P₂O₅ 质量百分数计)含量;火焰光度计法测定全钾(K₂O 质量百分数)含量^[18]。

氮(磷、钾)素养分利用效率(Utilization efficiency)等于籽粒产量与植株氮(磷、钾)素积累量的比值;氮(磷、钾)素收获指数(Harvest index)等于籽粒氮(磷、钾)素积累量与植株氮(磷、钾)素积累量的比值。

1.6 数据处理与分析

2 a 试验结果基本一致,故取其平均值,采用 Excel 2007 和 DPS v 7.05 分析软件进行计算与统计分析。对处理间差异进行方差分析(ANOVA),并利用 Duncan 方法进行统计显著性检验。

2 结果与分析

2.1 RDI 对氮、磷、钾在植株不同器官分配的影响

2.1.1 RDI 对氮素积累与分配的影响

氮素是小麦籽粒蛋白质、核酸的主要组成元素之一,在籽粒产量和品质形成中起重要作用。表 1 为 RDI 条件下成熟期氮素在小麦植株不同器官的分配情况。成熟期冬小麦植株不同器官氮素含量、积累量和分配比例表现为:籽粒大于茎叶;但调亏阶段Ⅳ(拔节—抽穗)的中(M)、重(S)度调亏处理的氮素积累量及分配比例表现为:籽粒小于茎叶;究其原因主要是由于这 2 个处理的籽粒产量过低所致。

表 1 RDI 条件下成熟期氮素在冬小麦植株不同器官的分配
Tab. 1 Nitrogen distributions in different organs of winter wheat plants at maturity stage under RDI

调亏阶段	调亏度	氮素质量分数/%		氮素积累量/(mg·株 ⁻¹)		分配比例/%	
		籽粒	茎叶	籽粒	茎叶	籽粒	茎叶
Ⅰ	CK	3.54	1.42	67.90	23.06	73.01	26.99
	L	3.09**	1.41	52.89	27.67	64.99	35.01
	M	3.31*	1.22	53.36	21.59	71.07	28.93
	S	3.26*	1.28	54.80	21.80	71.14	28.86
Ⅱ	L	3.14*	1.27	69.22	20.02	77.05	22.95
	M	3.17*	1.14	65.87	16.48	79.33	20.67
	S	3.36*	1.22	67.38	18.94	78.04	21.96
Ⅲ	L	3.19*	1.53	46.01	23.96	65.46	34.54
	M	3.17*	1.29	56.43	20.93	71.97	28.03
	S	3.22*	1.18	53.92	17.94	74.63	25.37
Ⅳ	L	3.52	1.38	36.01	22.49	61.44	38.56
	M	3.60	1.93	22.29	31.04	41.24*	58.76
	S	3.43	1.72	25.82	28.75	46.11*	53.89
Ⅴ	L	3.55*	1.42	59.51	18.41	75.32	24.68
	M	3.69*	1.46	50.18	23.78	67.05	32.95
	S	3.98*	1.45	44.91	20.02	69.26	30.74

注:茎叶包括茎、叶、叶鞘、穗轴和颖壳。*表示达显著统计水平(P<0.05),**表示达极显著统计水平(P<0.01);下同。

这也显示了此阶段水分调亏籽粒产量低的可能原因之一是由于水分不足阻碍了氮向籽粒的转运。

具体分析各调亏阶段,不同水分调亏处理间存在差异性。在调亏阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,水分调亏显著降低籽粒氮含量;在阶段Ⅳ水分调亏对籽粒氮含量没有显著影响;在阶段Ⅴ水分调亏显著提高籽粒氮含量。对于籽粒氮素积累量,在阶段Ⅱ的轻度水分调亏(L)高于CK,其余各阶段水分调亏均低于CK,但差异均不显著($P>0.05$)。关于籽粒氮分配比例,阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ的水分调亏没有显著影响;阶段Ⅳ的水分调亏比CK低,其中,中(M)、重度(S)水分调亏比CK降低达显著水平($P<0.05$)。

在所有处理中,以阶段Ⅱ的轻度调亏(60%~65% FC)籽粒氮积累量最高(69.22 mg/株),比CK(67.90 mg/株)高1.32%;籽粒氮分配比例以此阶段的中度调亏(50%~55% FC)最高(79.33%),其次是重度调亏(78.04%),再次是轻度调亏(77.05%);分别比CK提高8.7%、6.9%和5.5%。

根据表1数据分析结果,从氮吸收与利用的角度考虑,阶段Ⅱ(越冬期)为适宜水分调亏阶段;阶段Ⅲ(返青期)为较适宜水分调亏阶段;阶段Ⅴ(灌浆期)为优质调亏阶段;而阶段Ⅰ(越冬前)和Ⅳ(抽穗期)为不宜水分调亏阶段。

2.1.2 RDI对磷素积累与分配的影响

磷是作物的主要营养元素之一,它既是蛋白质、核酸、ATP的成分,又是许多酶和辅酶的成分,在作物蛋白质、淀粉、脂肪等物质的合成中有着不可替代的作用。RDI对磷素积累与分配的影响(表2)总体趋势是:成熟期冬小麦植株不同器官磷含量、积累量和分配比例表现为:籽粒大于茎叶;但调亏阶段Ⅳ中各调亏处理的磷积累量及分配比例表现为:籽粒小于茎叶,这与氮素的积累与分配情况相似,究其原因也主要是由于这3个处理的籽粒产量过低所致。这也显示了该阶段水分调亏籽粒产量低的可能原因之一是由于水分不足阻碍了磷向籽粒的转运。

具体分析各调亏阶段,不同水分处理间也存在着差异性。在调亏阶段Ⅰ,籽粒磷含量轻度调亏比CK高,中、重度调亏均比CK低,但差异均不显著($P>0.05$);在阶段Ⅱ、Ⅲ水分调亏对籽粒磷含量无规律性影响;在阶段Ⅳ、Ⅴ基本是随调亏度加重籽粒磷含量呈增加趋势,其中重度调亏(S)比CK提高21.64%,达极显著水平($P<0.01$);对于籽粒磷积累量和分配比例,在阶段Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ水分调亏均无显著影响;在阶段Ⅱ,各水分调亏处理的籽粒磷积累量和分配比例均高于CK,表现出水分调亏复水后作物

表2 RDI条件下成熟期磷素在冬小麦植株不同器官的分配

Tab.2 Phosphorous distributions in different organs of winter wheat plants at maturity stage under RDI

调亏阶段	调亏度	磷素质量分数/%		磷素积累量/(mg·株 ⁻¹)		分配比例/%	
		籽粒	茎叶	籽粒	茎叶	籽粒	茎叶
Ⅰ	CK	1.34	1.00	25.74	16.17	60.22	39.78
	L	1.40	0.98	24.23	19.09	55.21	44.79
	M	1.30	0.86	21.03	15.13	57.88	42.12
	S	1.31	0.71	21.96	11.92	64.52	35.48
Ⅱ	L	1.51	0.76**	33.23*	12.11**	73.26*	26.74
	M	1.28	0.64**	26.17	9.28**	74.13*	25.87
	S	1.37	0.80**	27.51	12.62**	68.75*	31.25
Ⅲ	L	1.16*	1.04	16.84	16.27	50.54	49.46
	M	1.23	0.62**	22.00	9.89*	68.54	31.46
	S	1.46	0.67*	24.75	10.22	69.88	30.12
Ⅳ	L	1.12**	1.06	11.47*	17.20	39.94*	60.06**
	M	1.47	1.24*	9.09*	20.05	31.53**	68.47**
	S	1.55**	1.09	11.84*	18.16	38.58*	61.42**
Ⅴ	L	1.50	0.87	25.12	11.33	67.94	32.06
	M	1.49	0.89	20.49	14.33	57.92	42.08
	S	1.63**	0.83	18.38	11.46	61.65	38.35

对磷吸收具有补偿或超补偿效应;在阶段Ⅳ,各水分调亏处理的籽粒磷积累量和分配比例均较CK降低,且达显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$)。

在所有处理中,以阶段Ⅱ的轻度调亏籽粒磷积累量最高(33.23 mg/株),其次是此阶段的重度调亏(27.51 mg/株),再次是中度调亏(26.17 mg/株);籽粒磷分配比例以阶段Ⅱ的中度调亏最高(74.13%),其次是轻度调亏(73.26%),再次是阶段Ⅲ的重度调亏(69.88%)。

根据表2数据分析结果,从磷吸收与利用的角度考虑,阶段Ⅰ(三叶—越冬)为适宜轻度水分调亏阶段,阶段Ⅱ(越冬—返青)为适宜调亏阶段,阶段Ⅲ(返青—拔节)为较适宜调亏阶段,调亏度以中度(50%~55% FC)为宜;阶段Ⅳ(拔节—抽穗)为不宜水分调亏阶段,阶段Ⅴ(抽穗—成熟)为优质调亏阶段。

上述结果与分析表明,适时适度的水分调亏,有利于磷素吸收与积累,提高磷素向籽粒分配的比例。因而生产中可通过实施RDI调节磷素代谢,提高磷肥利用效率。

2.1.3 RDI对钾素积累与分配的影响

钾营养与氮代谢有关,蛋白质合成需要钾,硝酸还原酶等酶类的合成也需要钾。钾能通过提高硝酸还原酶的活性而提高作物的蛋白质含量。钾还是影响作物光合作用的重要元素,它调节作物叶片气孔

的开闭,影响叶片对 CO₂ 的吸收;钾通过调控光合产物的供应,可调控蛋白质合成所需的碳架与淀粉所需底物。如表 3 所示,RDI 对钾素积累与分配的影响与氮、磷素的情况有明显不同。总体趋势是:无论调亏阶段和水分调亏度如何,成熟期小麦植株不同器官钾含量、积累量及其分配比例均表现为:籽粒小于茎叶;同时从表 3 还可看出,无论哪个阶段水分调亏都有利于钾素向营养器官分配。从钾素的生理功能考虑,这对作物是有利的。说明钾在小麦各器官间的分配除受源库调节外,本身的生理作用和代谢特性也是重要的影响因素。与氮、磷不同,钾主要累积在根、茎、叶等营养器官中,籽粒不是钾的主要累积器官^[17,22],只有在适宜水分情况下,钾才能较多地向籽粒转移和分配,水分调亏会使其转移受到抑制。

具体分析各调亏阶段,不同水分处理间也存在差异性。在阶段 I、II、III 籽粒钾含量各调亏处理均比 CK 高;其中,阶段 I 的各调亏处理均达显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$),阶段 II 的重度调亏和阶段 III 的轻度调亏达显著水平 ($P < 0.05$);阶段 IV、V 调亏对籽粒钾含量无显著影响。对于籽粒钾积累量与分配比例,阶段 I、II、III、V 各调亏处理均无显著影响;阶段 IV 的各调亏处理均比 CK 显著降低。大多数调亏处理对营养器官钾含量有显著或极显著影响,但对营养器官钾积累量基本无显著影响;对于钾在营养器官的分配比例,阶段 IV 的各水分调亏处理均比 CK 增加达极显著水平 ($P < 0.01$),其余阶段水分调亏对营养器官钾的分配比例无显著影响。

表 3 RDI 条件下成熟期钾素在冬小麦植株不同器官的分配

Tab.3 Potassium distributions in different organs of winter wheat plants at maturity stage under RDI								
调亏阶段	调亏度	钾素质量分数/%		钾素积累量/(mg·株 ⁻¹)			分配比例/%	
		籽粒	茎叶	籽粒	茎叶	总积累量	籽粒	茎叶
I	CK	0.61	2.80	11.70	46.03	57.73	21.80	78.20
	L	0.68 *	3.28 *	11.46	65.02	76.48	15.06	84.94
	M	0.64 *	3.56 *	10.30	63.05	73.35	14.23	85.77
	S	0.79 **	4.62 **	13.23	80.86 *	94.09 *	14.74	85.26
II	L	0.66	3.93 *	14.54	62.15	76.69	19.11	80.89
	M	0.68	3.00	13.74	43.50	57.24	24.08	75.92
	S	0.70 *	3.68 *	13.98	57.19	71.17	19.64	80.36
III	L	0.69 *	3.93 *	10.08	61.45	71.53	13.88	86.12
	M	0.62	4.11 **	10.72	67.27	77.99	14.31	85.69
	S	0.62	3.53	10.44	53.96	64.40	16.19	83.81
IV	L	0.58	3.60 *	5.93 *	58.40	64.33	9.21 *	90.79 **
	M	0.59	3.22	3.67 **	51.50	55.17	6.73 *	93.27 **
	S	0.59	3.46 *	4.38 *	57.75	62.13	7.13 *	92.87 **
V	L	0.71	3.64 *	11.83	47.12	58.95	20.37	79.63
	M	0.66	4.12 **	9.16	66.21	75.37	12.60	87.40
	S	0.72	4.01 **	8.08	55.38	63.46	12.81	87.19

根据表 3 数据分析结果,从钾在营养器官的积累量考虑,阶段 I (三叶—越冬)为适宜水分调亏阶段,水分调亏度为 40% ~ 45% FC;其次为阶段 III (返青—拔节),水分调亏度为 50% ~ 55% FC;再次为阶段 V (抽穗—成熟),水分调亏度为 50% ~ 55% FC。

2.2 RDI 对氮磷钾养分利用效率的影响

表 4 所示是 RDI 条件下冬小麦氮、磷、钾养分的利用效率。总体上看,无论调亏阶段和水分调亏度如何,冬小麦植株的养分利用效率基本趋势从大到小依次为:磷、钾、氮;养分收获指数从大到小依次为:氮、磷、钾;同时从表 4 还可看出,阶段 III 及其以前的适度水分调亏有利于提高氮、磷养分利用效率,之后阶段,尤其是阶段 IV 的水分调亏使氮、磷养

分利用效率显著降低;而无论哪个阶段水分调亏,均不利于钾素利用效率的提高。

从氮、磷利用效率和收获指数考虑,阶段 II (越冬—返青)为最适宜水分调亏阶段,水分调亏度为 50% ~ 55% FC;其次为阶段 III (返青—拔节),水分调亏度为 50% ~ 55% FC;再次为阶段 I (三叶—越冬),水分调亏度为 40% ~ 45% FC。

2.3 RDI 条件下各养分参数变化趋势

RDI 条件下冬小麦养分参数变化如表 5 所示。利用平均数表示参数的集中趋势,标准差表示离散程度,变异系数表示稳定性。由表 5 可以看出,在 RDI 条件下,氮、磷养分的籽粒积累量变异系数最大,其次是养分利用效率变异系数较大,再次是籽粒分配比例或收获指数的变异系数也较大,籽粒养分

表 4 RDI 条件下冬小麦氮、磷、钾利用效率

Tab.4 Nitrogen, phosphorous and potassium use efficiencies of winter wheat under RDI

调亏阶段	调亏度	籽粒产量/ (g·株 ⁻¹)	养分利用效率/(kg·kg ⁻¹)			养分收获指数/%		
			氮	磷	钾	氮	磷	钾
I	CK	43.97	20.61	45.15	35.66	73.01	60.22	21.80
	L	45.92	21.05	39.49	22.53	64.99	55.21	15.06
	M	39.37	21.50	45.06	22.40	71.07	57.88	14.23
	S	41.54	21.80	49.34	18.74	71.14	64.52	14.74
II	L	62.05	24.58	48.63	29.10	77.05	73.26	19.11
	M	58.45	24.98	58.39	36.43	79.33	74.13	24.08
	S	51.38	23.23	50.26	28.21	78.04	68.75	19.64
III	L	33.56	20.54	43.37	20.04	65.46	50.54	13.88
	M	51.57	22.73	55.88	24.02	71.97	68.54	14.31
	S	46.64	23.23	47.69	26.06	74.63	69.88	16.19
IV	L	25.17	17.43	35.59	15.88 [*]	61.44	39.94 [*]	9.21 [*]
	M	16.06	11.45 ^{**}	21.45 ^{**}	11.36 ^{**}	41.24 ^{**}	31.53 ^{**}	6.73 ^{**}
	S	15.90	13.53 ^{**}	24.80 ^{**}	12.36 ^{**}	46.11 ^{**}	38.58 [*]	7.13 ^{**}
V	L	45.11	21.25	45.38	28.90	75.32	67.94	20.37
	M	39.67	18.25	38.69	18.67 [*]	67.05	57.92	12.60
	S	29.38	17.40	37.85	17.95 [*]	69.26	61.65	12.81

表 5 RDI 条件下冬小麦植株养分参数变化

Tab.5 Changes of nutrient parameters in winter wheat plant

养分	参数	变幅	平均值	标准差	变异系数 CV/%
氮	籽粒含量/%	3.09 ~ 3.98	3.39	0.24	7.21
	籽粒积累量/(mg·株 ⁻¹)	22.29 ~ 69.22	51.66	14.09	27.29
	籽粒分配比例/%	41.24 ~ 79.33	67.94	10.72	15.78
	利用效率/(kg·kg ⁻¹)	11.45 ~ 24.98	20.22	3.77	18.65
	收获指数/%	41.24 ~ 79.33	67.94	3.77	15.78
磷	籽粒含量/%	1.12 ~ 1.63	1.38	0.14	10.39
	籽粒积累量/(mg·株 ⁻¹)	9.09 ~ 33.23	21.24	6.45	30.38
	籽粒分配比例/%	31.53 ~ 74.13	58.78	12.85	21.87
	利用效率/(kg·kg ⁻¹)	21.45 ~ 58.39	42.94	9.91	23.07
	收获指数/%	31.53 ~ 74.13	58.78	12.85	21.87
钾	籽粒含量/%	0.58 ~ 0.79	0.66	0.06	8.59
	籽粒积累量/(mg·株 ⁻¹)	3.67 ~ 14.54	10.20	3.29	32.23
	籽粒分配比例/%	6.73 ~ 24.08	15.12	4.99	33.03
	利用效率/(kg·kg ⁻¹)	11.36 ~ 36.43	23.02	7.40	32.14
	收获指数/%	6.73 ~ 24.08	15.12	4.99	33.03

含量变异系数较小。从养分参数变异系数看,3 种养分对水分变化的敏感性从大到小依次为:钾、磷、氮。变异系数大说明参数易受环境的影响而波动,另外也与品种特性有关。参数变异系数大也显示,通过水肥技术调控的可能性大。

2.4 RDI 对土壤氮磷钾残留量的影响

土壤水分影响作物对养分的吸收,因而也影响其在土壤中的残留量。残留在土壤中的大量肥料氮,会随降水和灌水淋溶到土壤深层,或随径流进入江、河、湖、海,引起土壤、地表和地下水的氮含量升高,产生富营养化问题^[23-24];或经氨挥发、反硝化,

以氨气(NH₃)、氮氧化物(N_xO_y)等形态进入大气,污染大气环境^[22-23]。本研究结果表明(图 1a,同一水分调亏阶段图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)),各阶段的轻(L)、中(M)、重(S)度水分调亏处理土壤残留氮均低于充分供水处理(CK),降低幅度为 6.1% ~ 44.8%;大多数处理与 CK 差异达显著水平($P<0.05$);其中,越冬期(II)的轻度调亏(L)、拔节期(IV)的中度调亏(M)与 CK 差异达极显著水平($P<0.01$)。说明水分调亏有利于增强作物对土壤氮素的吸收利用能力,从而减少肥料氮在土壤中的

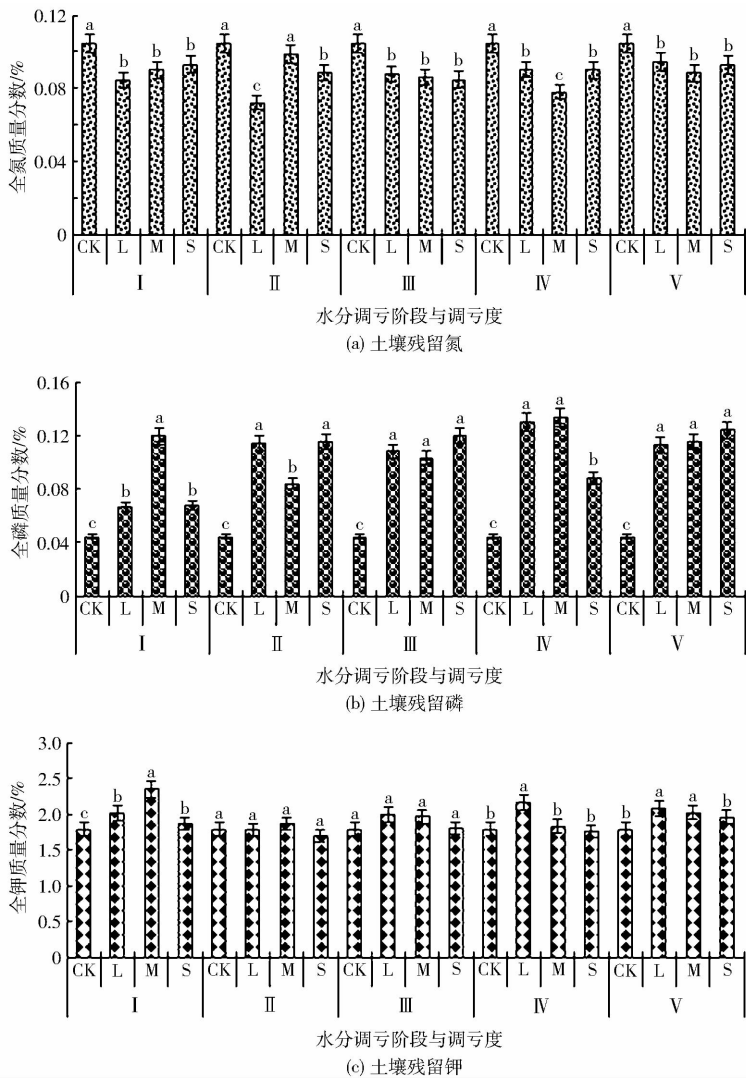


图 1 RDI 对氮、磷、钾土壤残留量的影响

Fig. 1 Effect of RDI on nitrogen, phosphorus and potassium residuals in soil

残留量。这不仅提高了作物肥料利用效率,而且减少了化学肥料对生态环境的污染。

图 1b 显示,各水分调亏处理土壤残留磷均高于充分供水处理(CK),增幅为 50.5% ~ 201.1%,各处理均与 CK 差异达极显著水平($P < 0.01$)。说明水分调亏不利于作物对土壤磷素的吸收利用。这是因为磷在土壤中的移动性差,降低土壤水分会进一步减小磷的移动性,因而降低作物对磷的吸收量。

图 1c 显示,水分调亏对土壤中钾的残留量影响较氮、磷小,但有些水分调亏处理也存在显著效应。阶段 I (冬前)的中度(M)调亏残留量比 CK 增加达极显著水平($P < 0.01$),轻度调亏(L)达显著水平($P < 0.05$);阶段 IV (拔节—抽穗)的轻度(L)调亏残留量比 CK 增加达显著水平($P < 0.05$);阶段 V (灌浆期)的轻、中度调亏达显著水平($P < 0.05$)。

综上所述,在实施 RDI 过程中应根据其对氮、磷、钾影响的差异性,结合利用水肥耦合理论与技术,充分发挥水分与养分的协同效应。

3 讨论

进入小麦体内的养分在籽粒和营养器官之间的分配反映了作物对养分的有效利用程度,分配到籽粒的养分比率越大,养分被有效利用的程度越高^[26]。有研究认为,随土壤水分胁迫加重,植株将吸收的氮、磷营养较多地分配于根部,在地上部分的比率较少,最终分配至穗部的比率降低,从而导致氮、磷、钾肥利用效率和产量降低^[27]。但已有研究多限于阶段性或全生育期静态控水,本文则研究了不同阶段控水的后效性和复水后的养分吸收“补偿效应”。结果表明,适时适度的水分调亏复水后有利于养分向籽粒分配,而水分过多或不适宜的亏水,则导致养分过多分配至茎、叶等营养器官。因为水分高时小麦根系分布浅,不易吸收深层养分;并且,高水分条件下的小麦往往前期营养生长过旺,抗逆境能力差,同样影响小麦对养分的吸收。水分含量过高会引起深层渗漏,渗漏水带走土壤中养分,降低

土壤溶液中养分浓度,因而进一步影响作物对养分的吸收^[17]。

本试验结果表明,无论调亏阶段和水分调亏度如何,冬小麦植株的养分利用效率基本趋势从大到小依次为:磷、钾、氮;养分收获指数从大到小依次为:氮、磷、钾。这与刘克礼等^[20]关于春小麦的研究结果不同。其不同可能是由于供试作物的基因型差异和试验地点的区域性影响以及试验方法不同所致。本研究结果还表明,阶段Ⅲ(返青—拔节)及其以前的适度水分调亏有利于提高氮、磷养分利用效率,之后阶段的调亏使氮、磷养分利用效率降低。这可以通过“源库理论”加以理解。拔节以前冬小麦植株处于营养器官生长阶段,土壤水分高使营养体大量生长,影响了生育后期籽粒的形成,结果源大而库小,抑制了进入冬小麦体内的氮、磷、钾养分从源(茎叶)向库(籽粒)的转运和分配。此外,本试验结果还表明,无论哪个阶段水分调亏,均不利于钾素利用效率的提高。这表明钾在小麦各器官间的分配除受源库调节外,本身的生理作用和代谢特性也是重要的影响因素。与氮、磷不同,钾主要累积在根、茎、叶等营养体,籽粒不是钾的主要累积器官^[17,22],只有在适宜水分条件下,钾才能较多地向籽粒转移和分配,水分调亏会使其转移受到抑制。

据有关文献资料,我国小麦等禾谷类作物的氮肥利用率约为 28%~41%,磷肥为 10%~20%,钾肥为 35%~50%^[28-29]。化肥利用率低,不仅造成养分大量浪费,制约粮食产量进一步提高,也带来了严重的生态与环境问题,特别是未被作物吸收利用而残留和累积在土壤中的大量氮和磷,已成为土壤、水体和大气污染的重要来源^[24,30]。研究表明,各阶段的水分调亏处理土壤残留氮均低于充分供水处理(CK),降低幅度为 6.1%~44.8%,大多数处理与 CK 差异达显著水平($P < 0.05$);其中,越冬期(Ⅱ)的轻度调亏(L)、拔节期(Ⅳ)的中度调亏(M)与 CK 差异达极显著水平($P < 0.01$)。说明水分调亏复水后有利于增强作物对土壤氮素的吸收利用能力,从而减少肥料氮在土壤中的残留量,提高了作物肥料利用效率,减少了化学肥料对生态环境的污染。与此相反,各水分调亏处理土壤残留磷均高于充分供水处理(CK),增加幅度为 50.5%~201.1%,各处理均与 CK 差异达极显著水平($P < 0.01$)。说明水分调亏不利于作物对土壤磷素的吸收利用。这是因为磷在土壤中的移动性差,降低土壤水分会进一步减小磷的移动性,因而降低作物对磷的吸收量。

多数阶段水分调亏对土壤中钾的残留量影响较小,只有越冬前的中度调亏残留量比 CK 增加达极显著水平($P < 0.01$),拔节—抽穗期的轻度调亏达显著水平($P < 0.05$)。

由于该试验结果是在盆栽条件下获得的,尽管采用了严格的控制方法加以模拟,但仍与田间试验和大田生产存在较大差异,因而结果有一定局限性,还需要进一步采用多种试验设计与处理技术相结合的方法进行大空间尺度、长时间系列的田间试验。

4 结论

(1) RDI 条件下,成熟期冬小麦植株不同器官氮、磷含量、积累量和分配比例表现为:籽粒大于茎叶;无论调亏阶段和水分调亏度如何,小麦植株不同器官钾素含量、积累量及其分配比例均表现为:籽粒小于茎叶。越冬—返青期的轻度(60%~65% FC)或中度(50%~55% FC)水分调亏复水后有利于氮、磷养分向籽粒运转与分配,而水分过多或不适宜的亏水,则导致养分过多分配至茎、叶等营养器官;抽穗—灌浆期的适度调亏(50%~55% FC)有利于提高籽粒中氮、磷的含量,因而提高籽粒产量,改善籽粒品质。

(2) 无论调亏阶段和水分调亏度如何,小麦植株的养分利用效率从大到小依次为:磷、钾、氮;养分收获指数从大到小依次为:氮、磷、钾。返青—拔节及其以前阶段的轻(60%~65% FC)、中度(50%~55% FC)水分调亏有利于提高氮、磷养分利用效率;之后阶段,尤其是阶段Ⅳ(拔节—抽穗)的水分调亏使氮、磷养分利用效率显著降低;但水分调亏不利于钾素利用效率的提高。

(3) 3 种养分对水分变化的敏感性从大到小依次为:钾、磷、氮。变异系数大说明参数易受环境的影响而波动,另外也与品种特性有关;参数变异系数大也表明通过水肥技术调控的可能性大。

(4) 水分调亏,尤其越冬期的轻度调亏(60%~65% FC)或拔节期的中度水分调亏(50%~55% FC)显著增强作物对土壤氮素的吸收利用能力,从而减少肥料氮在土壤中的残留量。因而提高了作物肥料利用效率,减少了化学肥料对生态环境的污染。但水分调亏有增加土壤磷、钾残留量的趋势。因此,在实施 RDI 过程中,应根据其对氮、磷、钾影响的异质性,结合水肥耦合理论与技术,充分发挥水分与养分的协同效应。

参 考 文 献

- 1 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2011[R]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- 2 WANG Zhaohui, LI Shengxiu, CECIL L Verab, et al. Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(11): 1405 – 1419.
- 3 LI Shengxiu, WANG Zhaohui, MALHI S, et al. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dry land areas of China[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 102: 223 – 265.
- 4 SEIFFERT S, KASELOWSKY J, JUNGK A, et al. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density [J]. *Agronomy Journal*, 1995, 87: 1070 – 1077.
- 5 LI Shengxiu. Management of soil nutrients on dry lands in china for sustainable agriculture [J]. *Soil and Environment*, 1999, 2(4): 293 – 316.
- 6 OHASHI Y, SANEOKA H, FUJITA K. Effect of water stress on growth, photosynthesis, and photoassimilates translocation in soybean and tropical pasture legume siratro [J]. *Soil Science and Plant Nutrient*, 2000, 46(2): 417 – 425.
- 7 党建友, 裴雪霞, 张晶, 等. 秸秆还田条件下灌水模式对冬小麦产量和水肥利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2511 – 2516.
DANG Jianyou, PEI Xuexia, ZHANG Jing, et al. Effects of irrigation mode on winter wheat yield and water-and nutrient use efficiencies under maize straw returning to field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2511 – 2516. (in Chinese)
- 8 QIU G Y, WANG L, HE X, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1848 – 1859.
- 9 HUANG M L, DENG X P, ZHOU S L, et al. Nutrient uptake and use efficiency of diploid, tetraploid, and hexaploid wheats under different water and nutrition conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(5): 708 – 716.
- 10 尹飞虎, 曾胜和, 刘瑜, 等. 滴灌春麦水肥一体化肥效试验研究[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(12): 2299 – 2303.
YIN Feihu, ZENG Shenghe, LIU Yu, et al. Study on water and fertilizer coupling of drip irrigation spring wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(12): 2299 – 2303. (in Chinese)
- 11 钟永红, 陈江生. 水肥条件对冬小麦氮磷养分吸收及产量影响[J]. *陕西农业科学*, 2010(3): 53 – 55.
ZHONG Yonghong, CHEN Jiangsheng. The effects of water and fertilizer on nitrogen and phosphorus uptake and winter wheat yield[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2010(3): 53 – 55. (in Chinese)
- 12 徐明杰, 董嫚嫚, 刘会玲, 等. 不同管理方式对小麦氮素吸收、分配及去向的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1084 – 1093.
XU Mingjie, DONG Xianxian, LIU Huiling, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1084 – 1093. (in Chinese)
- 13 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 144 – 151.
SHI Xueshuang, LI Fahu, YAN Baoying, et al. Effects of water deficit at different growth stages on water use and yield of spring highland barley[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 144 – 151. (in Chinese)
- 14 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 131 – 138.
DANG Hongkai, LI Wei, CAO Caiyun, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 131 – 138. (in Chinese)
- 15 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 150 – 160.
SHEN Xiaojun, SUN Jingsheng, ZHANG Jiyang, et al. Effects of different water treatments on yield and water use of transplanted cotton on following wheat harvest[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 150 – 160. (in Chinese)
- 16 金柯, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究: I. 不同降雨年型对 N、P、水配合效应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(1): 1 – 7.
JIN Ke, WANG Deshui, CAI Dianxiong, et al. Response and interaction for water and fertilizer I. interaction of N, P and water in the year of different precipitations [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(1): 1 – 7. (in Chinese)
- 17 赵炳梓, 徐富安. 水肥条件对小麦、玉米 N、P、K 吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(3): 260 – 266.
ZHAO Bingzi, XU Fuan. N, P, K uptake by winter wheat and maize as influence by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2000, 6(3): 260 – 266. (in Chinese)
- 18 王朝辉, 李生秀. 不同生育期缺水 and 补充灌水对冬小麦氮磷钾吸收及分配影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 265 – 270.
WANG Zhaohui, LI Shengxiu. Effects of water deficit and supplemental irrigation at different growing stage on uptake and

- distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 8(3): 265–270. (in Chinese)
- 19 谷秋荣, 杨占平, 王秋杰, 等. 不同灌水量对土壤氮磷钾养分移动的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 30–33. GU Qiurong, YANG Zhanping, WANG Qiujie, et al. Effect of irrigation on nutrient movement of N, P and K in soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 30–33. (in Chinese)
- 20 刘克礼, 高聚林, 张永平, 等. 春小麦氮、磷、钾三要素利用率的研究[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3): 103–106. LIU Keli, GAO Julin, ZHANG Yongping, et al. Study on N, P, K utilization ratio of spring wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(3): 103–106. (in Chinese)
- 21 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 22 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1994: 10–44.
- 23 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240–242. LI Shiqing, LI Shengxiu. Leaching losses of nitrate from semiarid area agroecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 240–242. (in Chinese)
- 24 McIsaac G, David M, Gertner G, et al. Eutrophication: nitrate flux in the Mississippi River [J]. Nature, 2001, 414(6860): 166–167.
- 25 Xing G X. N₂O emission from cropland in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 1998, 52(52): 249–254.
- 26 米国华, 汤利, 张福锁. 两种熟相小麦籽粒建成期的氮素吸收与转运[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(3): 53–57. MI Guohua, TANG Li, ZHANG Fusuo. Nitrogen uptake and translocation during grain formation of two wheat cultivars with contrasting maturity appearance [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(3): 53–57. (in Chinese)
- 27 石岩, 林琪, 李素美, 等. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 50–56. SHI Yan, LIN Qi, LI Sumei, et al. Effect of soil water stress on nutrient distribution and yield of wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1998, 4(1): 50–56. (in Chinese)
- 28 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 213–249.
- 29 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科技出版社, 1998: 3–5.
- 30 NEW bould P. The use of fertilizer in agriculture: where do we go practically and ecologically [J]. Plant and Soil, 1989, 115(2): 297–311.
-

(上接第 159 页)

- 22 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 144–152. LI Jianxing, HE Binghui, SHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 144–152. (in Chinese)
- 23 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403–412. LI Yuezhou, FU Jiangtao, HU Xiasong, et al. Experimental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 403–412. (in Chinese)
- 24 张宝军, 熊东红, 郭敏, 等. 干热河谷冲沟侵蚀劣地不同坡位草被生长和土壤水分关系研究[J]. 草业科学, 2015, 32(5): 686–693. ZHANG Baojun, XIONG Donghong, GUO Min, et al. The correlation between soil moisture and grass growth in different slope positions of gully badlands in dry-hot valley [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(5): 686–693. (in Chinese)
- 25 吕刚, 刘红民, 高英旭, 等. 排土场边坡根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 711–715. LÜ Gang, LIU Hongmin, GAO Yingxu, et al. Effect of roots distributions on soil anti-scourability in slope of the dump [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 711–715. (in Chinese)
- 26 张素, 熊东红, 苏正安, 等. 土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2014, 36(6): 721–725. ZHANG Su, XIONG Donghong, SU Zheng'an, et al. Research progress of influence factors in soil anti-scourability [J]. World Sci-Tech R&D, 2014, 36(6): 721–725. (in Chinese)
- 27 寇萌, 焦菊英, 王巧利, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 161–171. KOU Meng, JIAO Juying, WANG Qiaoli, et al. Fine root distribution characteristics of plant community in different vegetation zones in hill-gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 161–171. (in Chinese)
- 28 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 125–130, 172. ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Characteristics and influencing factors of soil shear strength during maize growing period [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 125–130, 172. (in Chinese)