

黄土高原南部夏季不施肥种植玉米 对旱地土壤残留养分的利用

张文伟, 王朝辉, 李利利, 李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:夏季降水是造成我国西北黄土高原旱地土壤硝态氮淋溶的主要原因。通过田间长期定位试验研究了冬小麦收获后,不施肥种植夏玉米而利用土壤残留养分阻止硝态氮淋溶的效应。结果表明,小麦播前施氮量增加,夏玉米收获期生物量和子粒产量增加,但磷肥用量增加对其影响不明显。小麦播前施氮量增加,夏玉米氮磷钾累积增加,施磷量增加,氮钾素累积降低,磷素累积无显著变化。土壤剖面含水量随小麦播前施氮量增加而降低,不同施磷量土壤剖面水分累积量的差异显著减少。不施肥种植夏玉米可以有效阻止和减少土壤剖面硝态氮淋溶,但在小麦播前施氮 240 和 320 kg·hm⁻² 时仍有较明显淋溶,其累积峰逐渐向深层土壤转移,造成氮素损失。施磷时,土壤剖面 0~220 cm 硝态氮累积量下降,220 cm 以下土层变化不明显。

关键词:夏玉米;养分;土壤水分;硝态氮

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1451-07

Utilization of Residual Nutrients in Soil by Summer Maize Cropping with No Fertilization in Southern Area of the Loess Plateau

ZHANG Wen-wei, WANG Zhao-hui, LI Li-li, LI Sheng-xiu

(College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: It is the rainfall that is the main reason for nitrate leaching in dryland soil in the southern area of the Loess Plateau. A long-term field experiment with the rotation of winter wheat and summer maize was initiated in 2004, and the N and P fertilizer were applied before winter wheat seeding, summer maize was seeded with no fertilizer added to study how the crop utilize residual nutrient in soil and prevent nitrate leaching under no fertilization condition. The result showed that the biomass and grain yield of summer maize increased with the increase of N rates applied before wheat seeding, but the increase of P rates had no effect on them. N, P and K uptake of summer maize increased with N rates. However, N and K uptake of summer maize decreased, and P uptake had no significant changes with P rate increasing. The amount of water in soil profile decreased with the increase of N rates before winter wheat seeding, while the difference of soil water at different soil layers decreased significantly over P rates. In conclusion, summer maize cropping with no fertilization effectively stopped and decreased soil nitrate leaching, but when too much N, such as 240 and 320 kg N·hm⁻² of N fertilizer was used before winter wheat seeding, the nitrate could still be leached down to very deep soil layers, the nitrate leaching peak was obviously moving down to deep layers, and this might result in N loss finally. Nitrate accumulation in 0~220 cm soil layers decreased at different P rates applied before wheat seeding, and it had no significant changes for that in 220 cm to 300 cm layers.

Keywords: summer maize; nutrients; soil water; nitrate N

氮、磷是作物生长必需元素,对旱地作物优质高产有重要作用。但不合理的氮磷投入也会造成作物

品质下降、资源浪费以及环境问题,制约农业的高效和可持续发展。张福锁等^[1]认为目前我国土壤和植物营养的现状主要有两个特点:一是土壤养分由大面积缺乏向过量累积方向发展;二是过量施肥现象极其普遍,养分利用效率明显降低。今后我国农业可持续发展的关键是同时大幅度提高作物产量和养分利用效率。过量使用化肥已经产生了严重的环境问题^[2-4]。同时化肥大量使用加速了矿产资源和社会资源的消

收稿日期:2008-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(40671107 和 30871596);国家科技支撑项目(2008BADA4B09);公益性行业(农业)科研专项(200803030)

作者简介:张文伟(1983—),男,甘肃镇原人,主要从事植物氮磷方面的研究。E-mail:weiye-0333@163.com

通讯作者:王朝辉 E-mail:w-zhaohui@263.net

耗^[5-6]。在化肥投入直线增长的同时,粮食增产停顿,导致化肥增产效益和利用率大幅度降低^[7]。

我国西北大部分地区氮肥用量远远超过当前产量水平的需求量和专家推荐量,导致肥料利用率下降,氮素向环境中的损失增加。水分是硝酸盐在土壤剖面中运移的载体^[8],研究发现,每2~3 mm的降雨可使硝酸盐下移10 mm^[9]。氮肥施用量和土壤中硝酸盐含量与淋失量密切相关,过量和不当施肥导致硝酸盐在土壤中大量累积和淋失^[10-11]。高亚军等^[12]的研究发现,施氮量为225、337.5、450 kg·hm⁻²时,硝态氮累积量分别为不施氮处理的1.6、2.1和4.1倍,说明大量施肥可造成硝酸盐的明显累积。硝态氮在土壤中的大量累积是淋溶损失的基础,而过量施用氮肥是硝态氮累积的根本原因。因此,控制氮肥用量是减少土壤硝态氮累积,避免农田地下水污染的根本途径。

黄土高原旱地硝酸盐的淋失主要发生在降雨集中的7—9月份。这一季节正好是夏玉米生长时期,而淋溶的硝酸盐主要是上季作物收获后残留和玉米生长季节施入土壤的氮素。如果在上季作物收获后土壤有大量的硝态氮残留,玉米生长季节不施氮应该可以有效减少或阻止土壤残留硝态氮的淋溶,提高肥料利用率。因此本试验采用冬小麦播前施肥,夏玉米种植时不施肥的方式,设置不同氮磷用量的田间长期定位试验,研究我国西北旱地冬小麦/夏玉米轮作体系中夏玉米的生长对土壤水分和残留硝态氮的利用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于西北农林科技大学农作一站,处于渭河三级阶地,海拔520 m左右。当地年平均气温13℃,年均降雨量550~600 mm,主要集中在7—9月。年均蒸发量1400 mm,属半湿润易干旱地区,冬小麦/夏玉米轮作是当地主要的种植制度。土壤为土垫旱耕人为土,其表层0~20 cm土壤基本理化性状为:容重1.24 g·cm⁻³, pH8.25,有机质13.79 g·kg⁻¹,全氮1.07 g·kg⁻¹,硝态氮5.43 mg·kg⁻¹,铵态氮2.41 mg·kg⁻¹,速效磷15.0 mg·kg⁻¹,速效钾182.4 mg·kg⁻¹。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验设计与管理

本试验为长期定位试验,始于2004年10月,分别以每公顷施磷(P₂O₅)100 kg为基础,设施氮(N)0、80、160、240和320 kg·hm⁻²5个水平;以每公顷施氮(N)160 kg为基础,设施磷(P₂O₅)0、50、100、150 kg·

hm⁻²4个水平,种植冬小麦,氮肥品种为尿素,磷肥为过磷酸钙。氮磷肥料均作为基肥在小麦播前一次撒入并与0~20 cm土壤混匀施入,在夏玉米种植时不再施其他肥料。夏玉米于冬小麦收获后播种。另设不施肥(不施任何肥料,翻耕,种植),免耕休闲(不施任何肥料,不翻耕,不种植)和裸地休闲(不施任何肥料,翻耕,不种植)3个对照。本试验采用随机区组设计,每个水平设4次重复,小区面积为4 m×10 m。供试小麦品种为小偃22,供试玉米品种为陕单308,采用当地农民传统方式进行管理。

1.2.2 样品采集与测定

本试验为2007年6月冬小麦收获后种植的夏玉米,10月中旬收获时每小区采样5株,分为茎叶(含穗苞叶)、穗轴和子粒,分别称重。取出部分样品在75℃下烘干,计算含水量,干样作为分析样品。剩余部分以小区为单位收获计产。植物样品用浓H₂SO₄-H₂O₂消煮,连续流动分析仪测氮,紫外分光光度计(钼锑抗比色法)测磷,火焰光度计测钾^[13]。

土壤样品用直径4 cm的土钻取土,采样深度300 cm,其中0~40 cm每10 cm作为一个样品,之后每20 cm作为一个样品。每小区采样2点,混匀作为一个样品。土壤含水量采用烘干法测定。硝态氮用鲜土样,以1 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提,连续流动分析仪测定^[13]。

表中数据采用DPS软件进行方差分析,图中数据用Excel 2003表格处理软件。

2 结果与分析

2.1 夏玉米收获期的生物量与子粒产量

2.1.1 前季不同施氮量时夏玉米的生物量和子粒产量

小麦播前施氮量对后季夏玉米收获期生物量和子粒产量仍有显著影响(表1)。随小麦播前施氮量增加,生物量逐渐增加,在施氮320 kg·hm⁻²时最大,为8.35 t·hm⁻²。与不施氮相比,施氮时生物量增加0.40~5.55 t·hm⁻²。施氮量增加,玉米收获期子粒产量逐渐增加,在施氮320 kg·hm⁻²时最大,为4.30 t·hm⁻²。与不施氮相比,施氮时夏玉米子粒产量增加0.05~3.46 t·hm⁻²,但不施氮和施氮80、160 kg·hm⁻²时子粒产量间无显著变化。

小麦播前施氮时,玉米收获指数随施氮量增加而增加。施氮240、320 kg·hm⁻²时,玉米收获指数达到45.94%和49.73%。施氮80 kg·hm⁻²和不施氮时,由于前季小麦生长对土壤氮素的利用,土壤中残留的氮素

表 1 前季小麦氮磷肥用量对夏玉米收获期生物量和子粒产量的影响

Table 1 Effects of N and P rates before wheat seeding on biomass and grain yield of summer maize at harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

施氮量/kg N·hm ⁻²	生物量/t·hm ⁻²	子粒产量/t·hm ⁻²	收获指数/%	施磷量/kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²	生物量/t·hm ⁻²	子粒产量/t·hm ⁻²	收获指数/%
0	2.80d	0.84c	29.34bc	不施肥	2.64c	0.72c	26.23c
80	3.20cd	0.89c	26.69c	0	6.31a	2.63a	41.53a
160	4.12c	1.48c	35.93b	50	3.59b	1.21b	33.11b
240	6.92b	3.22b	45.94a	100	3.61b	1.10b	28.74bc
320	8.35a	4.30a	49.73a	150	3.15bc	0.95bc	28.58bc

注:同一栏数据后不同小写字母表示差异显著(LSD 检验, $P<0.05$),下同。

无法满足夏玉米生长季节的需求,许多玉米植株在生长期明显表现出氮素缺乏症状,只开花不结实,因此收获指数仅为 26.69%和 29.34%。

2.1.2 前季不同施磷量时夏玉米的生物量和子粒产量

小麦播前磷肥用量对后季夏玉米收获期生物量和子粒产量的影响因施磷量多少而异。不施磷时,生物量和子粒产量均达到最大值,分别为 6.31 和 2.63 t·hm⁻²,收获指数也达到最大值,为 41.53%。施磷 50、100 kg·hm⁻² 时玉米生物量和子粒产量无显著差异。收获指数随施磷量增加有降低趋势,但在施磷 100 和 150 kg·hm⁻² 时无显著差异。与不施磷相比,施磷时收获期生物量和子粒产量都较低。在玉米生长期,土壤氮素严重缺乏导致结实率明显降低,收获指数仅为 28.58%~33.11%。不施肥时,玉米生物量和子粒产量均最低,收获指数仅为 26.23%。

2.2 夏玉米对冬小麦收获后土壤残留养分的利用

2.2.1 前季不同施氮量时夏玉米对土壤残留养分的利用

收获期玉米植株吸氮量在不施氮和施氮 80、160 kg·hm⁻² 时无显著差异,之后随施氮量增加逐渐增加,在施氮 320 kg·hm⁻² 时达到最大,为 73.76 kg·hm⁻²。子粒吸氮量变化趋势与植株一致,在施氮 320 kg·hm⁻² 时达到最大,为 52.90 kg·hm⁻²。施氮 240 和 320 kg·hm⁻² 时植株吸氮量的增加主要是由于过量施氮导致生物量的增加造成的。不施氮和施氮 80、160 kg·hm⁻² 时土壤氮素缺乏,造成生物量较低,植株吸氮量亦较低(表 2)。氮用量对夏玉米收获期吸磷量的影响因施氮量而异。与其他施氮量水平相比,施氮 240 和 320 kg·hm⁻² 时植株和子粒吸磷量均达到显著水平。不施氮和施氮 80、160 kg·hm⁻² 时子粒吸磷量无显著差异。植株吸磷量在不施氮时最低,为 6.18 kg·hm⁻²。随小麦播前施氮量增加,夏玉米收获后植株吸钾量增加,但在施氮 240 和 320 kg·hm⁻² 时增加无显著变化。子粒吸钾量在施氮 240 和 320 kg·hm⁻² 时与其他施氮量处

理差异达到显著水平。不施氮和施氮 80、160 kg·hm⁻² 时,子粒吸钾量均无显著差异。

2.2.2 前季不同施磷量时夏玉米对土壤残留养分的利用

磷肥用量对夏玉米收获后植株吸氮量的影响同时对生物量的影响一致(表 3),吸氮量的差异主要由生物量的差异造成。与不施肥相比,施磷与否,玉米收获期子粒和植株吸氮量均有所增加,但施磷时不同施磷量下吸氮量无显著变化。不施磷时玉米收获期子粒和植株吸磷量与其他处理相比显著增加,而施磷 50、100、150 kg·hm⁻² 时子粒和植株吸磷量无明显差异。不施肥时玉米收获期植株和子粒吸磷量均最低。

表 2 前季小麦氮肥用量对夏玉米收获期氮磷钾素累积量的影响

Table 2 Effects of N rates before wheat seeding on N, P and K uptake of summer maize at harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

施氮量/ kg N·hm ⁻²	吸氮量/kg N·hm ⁻²		吸磷量/kg P·hm ⁻²		吸钾量/kg K·hm ⁻²	
	子粒	植株	子粒	植株	子粒	植株
0	9.21c	19.75c	2.63b	6.18c	8.82b	54.06bc
80	9.61c	21.82c	2.62b	6.59bc	8.80b	64.46bc
160	16.09c	30.46c	4.42b	9.17b	14.95b	76.63b
240	34.09b	51.27b	8.85a	12.23a	31.01a	125.17a
320	52.90a	73.76a	10.34a	13.22a	39.57a	130.62a

表 3 前季小麦磷肥用量对夏玉米收获期氮磷钾素累积量的影响

Table 3 Effects of P rates before wheat seeding on N, P and K uptake of summer maize at harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

施磷量/ kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²	吸氮量/kg N·hm ⁻²		吸磷量/kg P·hm ⁻²		吸钾量/kg K·hm ⁻²	
	子粒	植株	子粒	植株	子粒	植株
不施肥	7.64c	18.23c	2.11c	6.13b	7.69c	49.86c
0	29.65a	45.46a	6.33a	9.77a	25.72a	123.71a
50	12.68b	25.54b	3.38b	7.18b	11.88b	71.32b
100	11.64bc	25.19b	3.23b	7.15b	11.11b	63.39bc
150	10.03bc	21.45bc	2.84bc	6.92b	10.13bc	59.28bc

无论施磷与否,植株和子粒吸钾量都比不施肥时高,而不施肥时夏玉米收获后植株和子粒吸钾量均达最大,植株和子粒吸钾量分别达到 123.71 、 $25.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施磷 50 、 100 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时植株和子粒吸钾量间均无显著变化。可见,在缺氮的情况下,土壤磷素充分并不能促进作物对土壤氮、磷、钾的吸收利用。

2.3 夏玉米收获后的土壤水分

2.3.1 前季不同施氮量时夏玉米收获后的土壤水分

夏玉米收获后土壤剖面各层次水分含量增加(图 1),这主要与玉米种植期间降雨充沛有关。另一方面,玉米生长期间地上部生物量远远低于小麦生长期,也是土壤水分消耗减少的一个原因。在夏玉米收获后(图 1-b),不同施氮量下土壤剖面水分累积量的差异幅度变小,尤其表现在 $60 \sim 160 \text{ cm}$ 土层上,水分累积量主要集中在 $50 \sim 70 \text{ mm}$ 。 160 cm 以下剖面上土壤水分累积随前季作物施氮量的增加而降低。土壤剖面水分累积峰值出现在 100 cm 左右土层,在 200 cm 左右土层水分累积量最低。可见,深层土壤水分有逐渐向下移动的趋势,随土壤水分的补充,土壤剖面上形成新的水分累积峰值。

比较各施氮量时土壤剖面水分含量的变化趋势可以看出,随小麦播前施氮量增加,土壤水分的累积量逐渐减少,尤其在深层土壤上表现更明显。由图 1-b 可以看出,在 120 cm 以下土层上,施氮 320 、 240 、 160 、 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土层中的含水量依次增加,但仍低于不施氮时,这主要由于施氮使生物量显著增加,加大了对土壤水分的消耗,向土壤深层移动的水分的量减少。

2.3.2 前季不同施磷量时夏玉米收获后的土壤水分

与冬小麦收获后相比,土壤剖面各层次水分含量在玉米收获后增加(图 2),这与氮肥用量对土壤剖面水分的影响结果一致。夏玉米收获后(图 2-b),不同施磷量下土壤剖面水分累积量的差异显著减少,在 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层与不施肥和裸地休闲条件下含量基本一致, 200 cm 以下土层时低于裸地休闲,尤其在施磷 100 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时比较明显。与小麦收获后相比, $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层水分累积量增加比较显著,在 100 cm 左右土层形成水分累积峰。

2.4 夏玉米收获后的土壤硝态氮

2.4.1 前季不同施氮量夏玉米收获后的土壤硝态氮

夏玉米收获后土壤剖面硝态氮累积量明显低于小麦收获后(图 3)。不施氮和施氮 80 、 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤剖面硝态氮累积量与免耕休闲基本一致(图 3-b),施氮 240 和 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时仍高于免耕休闲,但与小麦收获后的累积量相比明显降低。施氮 240 和 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 300 cm 土层上硝态氮总累积量分别由小麦收获后的 305.98 和 $338.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下降到 222.71 和 $244.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层硝态氮累积量明显下降,从小麦收获后的 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右下降到 $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,施氮 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时明显高于施氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。硝态氮累积峰所处的土层由播前的 20 cm 下移到 120 cm 和 160 cm ,这与夏玉米生长季节降雨量大有直接关系。表层土壤中的硝态氮在冬小麦收获后累积量大,夏玉米在生长前期对氮素的需求并不大,导致大量残留硝态氮随雨水下渗转移到深层土壤,使得

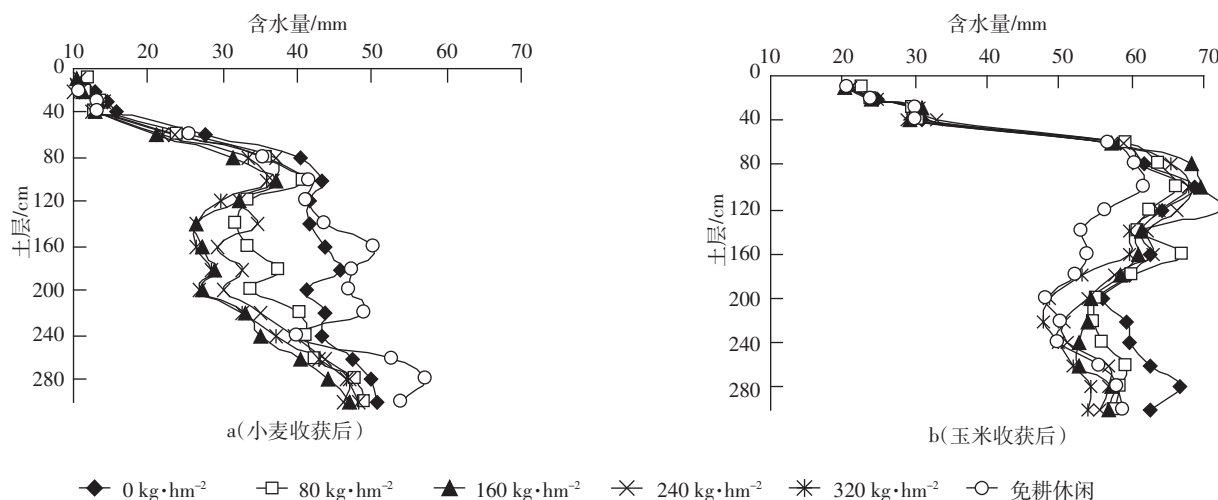


图 1 小麦播前氮肥用量对夏玉米收获后土壤剖面水分的影响

Figure 1 Effects of N rates before wheat seeding on water distribution in soil profile at summer maize harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

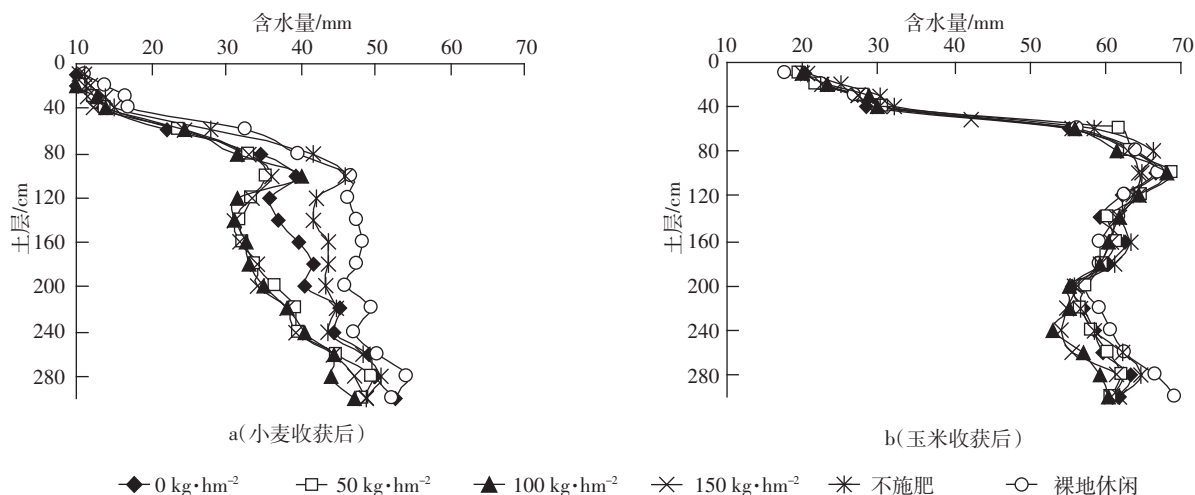


图2 小麦播前磷肥用量对夏玉米收获后土壤剖面水分的影响

Figure 2 Effects of P rates before wheat seeding on water distribution in soil profile at summer maize harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

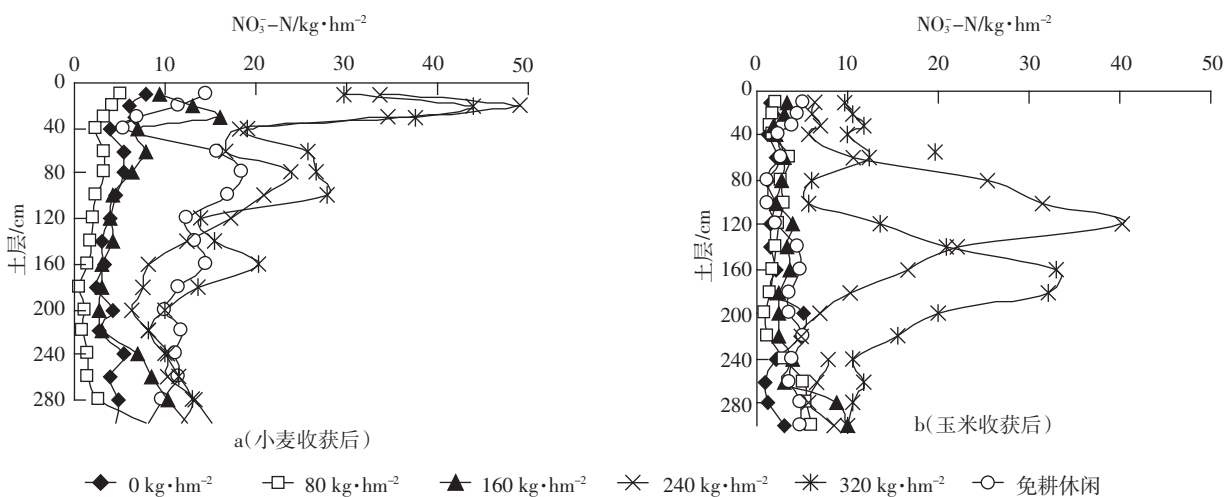


图3 小麦播前氮肥用量对夏玉米收获后土壤剖面硝态氮的影响

Figure 3 Effects of N rates before wheat seeding on NO_3^- -N content in soil profile at summer maize harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

土壤剖面硝态氮累积形成新的累积峰。随时间推移,硝态氮累积峰逐渐下移,造成氮素损失。

2.4.2 前季不同施磷量夏玉米收获后的土壤硝态氮

夏玉米收获后,土壤剖面上硝态氮累积量明显低于小麦收获后(图4),0~220 cm 土层中的硝态氮的累积量已经无明显差异,但在220 cm 以下土层中,不施磷和施磷50、100和150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时土壤剖面硝态氮累积量仍明显高于不施肥和裸地休闲。可见,夏季不施肥种植玉米,前季不同施磷量时作物虽可充分利用220 cm 以上土层的残留硝态氮,但并不改变因前季作物施氮而造成的深层土壤硝态氮残留。

3 讨论与结论

研究表明,随小麦播前施氮量增加玉米生物量和子粒产量增加,在施氮320 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时均达最大。前季磷肥用量对夏玉米收获期生物量和子粒产量影响不明显,且与不施磷相比,施磷时夏玉米收获期生物量和子粒产量均显著下降。由于磷肥当季利用率低,大量施磷时土壤中的速效磷含量显著增加^[14],而这些累积在土壤中的磷后效很高^[15-16],使得土壤中残留的氮磷比例严重失调,造成夏玉米收获期地上部生物量和子粒产量显著下降。

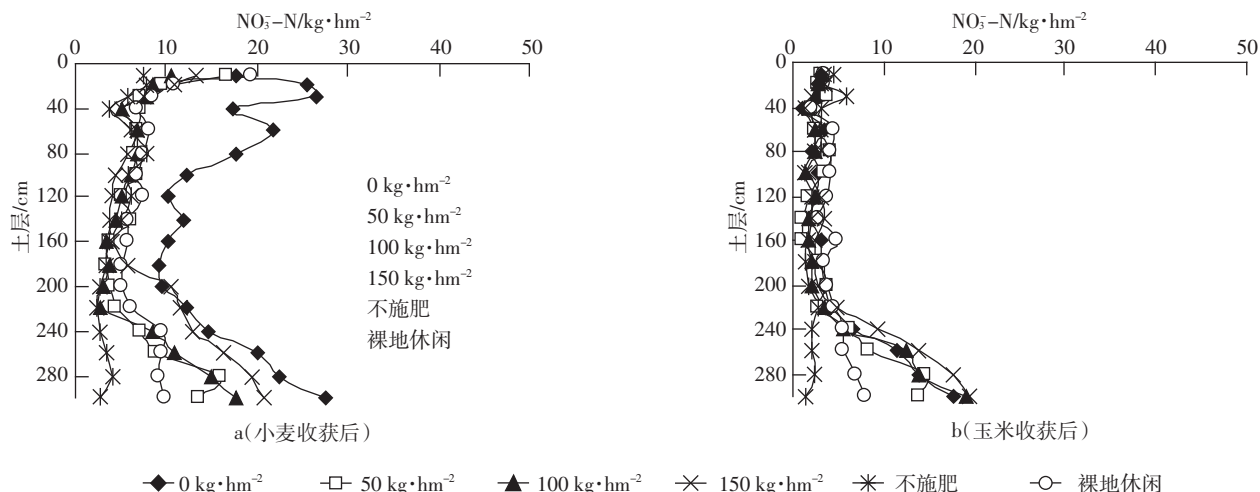


图4 小麦播前磷肥用量对夏玉米收获后土壤剖面硝态氮的影响

Figure 4 Effects of N rates before wheat seeding on $\text{NO}_3\text{-N}$ content in soil profile at summer maize harvest in a winter wheat and summer maize rotation system

随小麦播前施氮量增加, 玉米收获期植株吸氮量、吸磷量和吸钾量增加, 但在施氮量较低时植株吸氮量、吸磷量和吸钾量增加不显著。与不施磷相比, 施磷时夏玉米收获期植株吸氮量、吸磷量和吸钾量显著降低。但随施磷量增加, 植株吸氮量、吸磷量和吸钾量降低的差异不显著^[17], 这主要由土壤残留氮素状况引起的生物量差异不显著造成。

夏玉米收获后, 土壤剖面含水量变化比较明显。由于夏玉米生长季节降雨比较集中, 土壤剖面水分累积量均有所增加, 但随施氮量增加, 地上部生物量增加显著, 对土壤水分消耗增大, 导致土壤剖面含水量降低。夏玉米收获后不同施磷量时土壤剖面水分累积量的差异显著降低, 这主要与不同施磷量时地上部生物量差异降低, 水分消耗差异减少以及当季降雨对土壤剖面水分的补充有关。

夏季不施肥种植夏玉米可以显著阻止和减少土壤剖面硝态氮的淋溶, 但小麦播前施氮量过大时并无法完全阻止硝态氮向深层土壤淋溶。夏玉米收获后, 土壤剖面硝态氮累积量整体下降。不施氮和施氮 80 、 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤硝态氮累积没有下移趋势, 施氮 240 和 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 $0\sim 300 \text{ cm}$ 土壤剖面硝态氮总累积量与小麦收获后相比分别降低 83.27 和 $93.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但硝态氮累积峰所处的土层逐渐下移, 这与冬小麦收获后表层土壤硝态氮累积量大和夏玉米生长季节降雨集中有直接关系。夏玉米播前表层土壤中累积的大量硝态氮在降水的作用下向土壤深层淋移, 使得土壤剖面硝态氮累积形成新的累积峰。随时间的

推移, 硝态氮累积峰逐渐下移, 造成氮素损失。虽然夏玉米生物量大, 需水量高, 但其生长季节降雨量高^[18], 田间土壤水仍易达到饱和而发生淋溶^[19], 进而造成氮素损失。袁新民等^[20]的试验发现, 增施磷肥由于增加了玉米对氮的吸收和对水分的利用而有效地降低了土壤中硝态氮的累积。但在我们的试验中, 前季小麦不同施磷量时, 不施肥种植的夏玉米收获期 $0\sim 220 \text{ cm}$ 土层中硝态氮累积量无显著差异, 但明显低于 220 cm 以下土层, 说明对夏玉米而言, 施磷减少硝态氮淋溶的作用可能仅限于 200 cm 以上的土层。

参考文献:

- [1] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694.
ZHANG Fu-suo, CUI Zhen-ling, WANG Ji-qing, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687-694.
- [2] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117-127.
- [3] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. 科技导报, 2005, 23(4): 47-51.
ZHU Zhao-liang, SUN Bo, YANG Lin-zhang, et al. Policy and counter-measures to control non-point pollution of agriculture in China[J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.
- [4] Zhang Fu-suo, Ma Wen-qi, Zhang Wei-feng, et al. Nutrient management in China: from production systems to food chain[C]//LI Chun-jian et al. (eds) *Plant nutrition for food security, human health and environmental protection*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [5] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关于我国资源、环境、粮食安全和可持续

- 发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, 27(3):33-40.
- MA Wen-qi, ZHANG Fu-suo, ZHANG Wei-feng. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3):33-40.
- [6] 张卫锋, 马文奇, 张福锁, 等. 中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3):378-386.
- ZHANG Wei-feng, MA Wen-qi, ZHANG Fu-suo, et al. Comparative analysis of the superiority of China's phosphate rock and development strategies with that of the United States and Morocco[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3):378-386.
- [7] 张福锁, 陈新平, 高祥照, 等. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, GAO Xiang-zhao, et al. The study and application of nutrients resource integrated management technology on coordination crop high-yield and environmental protection[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.
- [8] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1):24-28.
- JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1):24-28.
- [9] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6):291-297.
- ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Advance of research on farmland nitrogen leaching[J]. *Soils*, 1998(6):291-297.
- [10] Hansen E M, Djurhuus J. Nitrate leaching as affected by long-term N fertilization on a coarse sand[J]. *Soil Use and Manage*, 1996, 12(4):199-204.
- [11] 樊 军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1):23-26.
- FAN Jun, HAO Ming-de, DANG Ting-hui. Distribution and accumulation of NO_3^- -N in soil profile of long-term located fertilizer experiment[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):23-26.
- [12] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):61-64.
- GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu, LI Shi-qing, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6):61-64.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2000.
- [14] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科技出版社, 1994:261-262.
- Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. China fertilizer[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994:261-262.
- [15] Sahrawat K L, Rego T J, Burford J R, et al. Response of sorghum to fertilizer phosphorus and its residual value in a Vertisol [J]. *Fertilizer Research*, 1995, 41(1):41-47.
- [16] Bolland M D A. The current and residual value of super-phosphate for lupins grown in rotation with oats and wheat on a deep sandy soil[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 31(3):319-329.
- [17] 李秋梅, 陈新平, 张福锁, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):152-156.
- LI Qiu-mei, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):152-156.
- [18] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- GUO Qing-fa, WANG Qing-cheng, WANG Li-ming. Chinese maize cultivation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004.
- [19] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1):65-70.
- LI Zong-xin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Soil nutrient leaching patterns in maize field under different fertilizations: an in situ study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1):65-70.
- [20] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4):397-403.
- YUAN Xin-min, TONG Yan-an, YANG Xue-yun, et al. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4):397-403.