

节水栽培冬小麦对下层土壤残留氮素的利用

吴永成^{1,2}, 周顺利¹, 王志敏^{1*}, 张 霞¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 2. 四川农业大学农学院, 雅安 625014)

摘要: 为了进一步明确华北地区冬小麦-夏玉米种植体系周年氮肥利用效率及其影响因素与机制, 试验在大田和原状土柱条件下进行了深层土壤放置¹⁵N 标记氮肥试验, 重点研究节水栽培冬小麦对夏玉米生育期淋洗到下层土壤的氮素利用能力。试验结果表明, 大田条件下冬小麦根系空间分布与夏玉米存在明显差异, 冬前苗期根系下扎深度可达 1.0m, 开花期最大根深已经超过 2.0m。而且, 小麦节水栽培(春季不灌水、春季灌 2 次水)相对于传统充分灌水模式(春季灌 4 次水)明显提高了根群中的下层根系比例。大田春不灌水和春灌 2 水条件下, 冬小麦对于 100~200cm 深层土壤放置的¹⁵N 标记氮肥均能吸收利用。土柱条件下¹⁵N 标记氮肥试验进一步验证了春灌 2 水条件下小麦对深层土壤氮素的吸收作用, 并表明植株对 100~110cm、120~130cm、140~150cm 各层土壤标记¹⁵N 的回收率分别为 16.26%、7.33%和 4.38%。研究表明, 节水栽培促进冬小麦根系深扎, 较多的深层根系增强了小麦对深层土壤氮素的吸收和利用能力, 有利于截获夏玉米季淋溶到下层土体的肥料氮, 从而可减少肥料氮损失。

关键词: 小麦; 根系; 节水栽培; 氮素利用

文章编号: 1000-0933(2005)08-1869-06 **中图分类号:** S512.1, Q958 **文献标识码:** A

Residual subsoil nitrogen utilization under water-saving cultivation in winter wheat

WU Yong-Cheng^{1,2}, ZHOU Shun-Li¹, WANG Zhi-Min^{1*}, ZHANG Xia¹ (1. Agronomy and Biotechnology College of China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Agronomy College of Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1869~1873.

Abstract: In order to identify the subsoil nitrogen capture ability of winter wheat under water saving cultivation, experiments were conducted in the field and undisturbed soil columns respectively with ¹⁵N-labeled nitrogen placement in deep soil layer. The field site was divided into plots at 5×6 m² size. Fertilizers including 157.5kgN/hm², 138.5kg P₂O₅/hm², 113kg K₂O/hm² and 30kg ZnSO₄/hm² were applied as basal fertilizer before sowing. Three irrigation treatments in spring season (w0: no-irrigation, w2: two times irrigation, and w4: four times irrigation) were established and replicated three times in a randomized block design. In field, ¹⁵N-labeled nitrogen fertilizer was injected into different soil layer through polyvinyl chloride (PVC) tubes with a 2-cm diameter before sowing for w2 treatment and 5 days before anthesis for w0 treatment respectively, and in soil column, ¹⁵N-labeled nitrogen fertilizer was injected into the soil at 100~110cm or 120~130cm or 140~150cm depth 48 days after sowing. Roots samples were obtained from all field plots at 3 growth stages [seedling before winter, anthesis and harvest] in 20cm increments to a depth of 200cm. Plant samples of winter wheat in field and soil column were taken at harvest stage. The atom of ¹⁵N abundance in wheat grain was analyzed by mass spectrometry. In the field, significant difference existed in spatial root distribution between winter wheat and summer maize. The root depth of winter wheat could reach 1.0m at seedling stage and exceed 2.0m at anthesis stage. Compared with traditional cultivation(w4 treatment)in winter wheat, water-saving cultivation (w0 or w2 treatment) significantly increased the weight percentage of root weight at deep soil, which could explain why ¹⁵N-labeled nitrogen placed in deep soil could be absorbed under w2 treatment or w0 treatment condition. In the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30300212); 国家 863 计划资助项目(2002AA2Z4021-1)

收稿日期: 2004-11-26; **修订日期:** 2005-04-26

作者简介: 吴永成(1973~), 男, 四川人, 博士生, 讲师, 主要从事作物生理生态研究. E-mail: ycwu2002@163.com

*** 通讯作者** Author for correspondence. E-mail: zhimin206@263.net

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China(No. 30300212) and National 863 Program(No. 2002AA2Z4021-1)

Received date: 2004-11-26; **Accepted date:** 2005-04-26

Biography: WU Yong-Cheng, Ph. D. candidate, mainly engaged in crop ecophysiology.

undisturbed soil column, wheat could also capture ^{15}N -labeled nitrogen in deep soil. Recovery rates of ^{15}N -labeled nitrogen in 100~110cm, 120~130cm, and 140~150cm soil layers were 16.26%, 7.33% and 4.38% respectively. The results suggested that under water-saving cultivation rooting depth of winter wheat was increased, and more roots in subsoil could improved the ability of capturing and using soil nutrient (especially subsoil residual nitrogen from fertilizer of summer maize), which is very important for the improvement of nitrogen fertilizer use efficiency in winter wheat-summer maize production system.

Key words: wheat; roots; water-saving cultivation; nitrogen utilization

农田肥料氮(硝态氮)向土壤深层的淋溶是氮肥利用率低、地下水污染的一个重要原因,近年来已引起国内外广泛关注^[1~5]。研究表明^[1,6],在我国华北冬小麦-夏玉米一年两熟地区,由于汛期降水这一不可控因素的影响,在夏玉米生长季节存在明显的硝态氮淋溶,而且施氮量越多,淋溶损失量越大。并认为,在控制玉米氮肥用量前提下,充分利用已经发生淋洗并残留在根区以下深层土壤中的硝态氮,对于提高农田系统氮素利用率和防止地下水污染具有重要意义^[6]。在河北沧州地区经过多年研究建立了“冬小麦节水高产技术体系”^[7],实践应用中发现,采用节水栽培技术,小麦氮肥施用量可以明显减少,氮肥利用效率则可明显提高^[8]。在节水栽培下,小麦深层根系比例明显增加,对深层土壤水的利用能力明显增强^[7]。由此,在冬小麦-夏玉米一年两作体系中,冬小麦节水栽培可能强化了吸收利用夏玉米季淋溶到深层土壤中残留氮素的机制,这也可能是节水栽培小麦节省氮肥用量的一个重要原因。为验证这一设想,在大田栽培和原状土柱模拟栽培条件下,利用 ^{15}N 同位素示踪技术,考察了节水栽培小麦对下层土壤氮素的再利用能力。

1 材料与方法

试验于 2003~2004 年在河北省吴桥县中国农业大学实验站进行。试验区属海河平原黑龙港流域中部,暖温带季风气候,海拔 14~22m,历年平均全年降水量 562mm,主要分布在 6~8 月份。试验地土壤为冲积型盐化潮土,壤质底粘,地下水位 7~9m,2m 土体有效贮水 420m³。耕作层土壤 pH 值 8.12,有机质含量 11.2g/kg,全氮 0.8g/kg,速效磷 18.2mg/kg,速效钾 76.8mg/kg,土壤肥力中等。试验地连续 5a 为冬小麦-夏玉米一年两熟制,冬小麦前茬夏玉米施氮量 180kg/hm²(在播后与九叶展期分施)。小麦品种为石家庄 8 号,在播种前浇足底墒水(灌水量 75mm 左右)基础上,设置 3 种水分处理,包括 2 种节水灌溉处理:春不灌水、春灌 2 水(拔节水+开花水,灌水额 75mm/次)和常规灌溉处理:春灌 4 水(起身水+孕穗水+开花水+灌浆水,灌水额 75mm/次),分别以 w0、w2、w4 表示(下同)。各处理均按节水省肥推荐施肥量^[8](尿素 225kg/hm²、磷二铵 300kg/hm²、硫酸钾 225kg/hm²、硫酸锌 22.5kg/hm² 和有机肥 7500kg/hm²)在播种前一次性底施。生育期内降雨量 109.50mm(图 1)。

1.1 大田小麦根系生长与空间分布测定

根系取样分别在冬前苗期、开花期和成熟期进行,用直径 8cm 的根钻在小麦行分层(每 20cm 为 1 层,深 2m)取土,每个水分处理取 6 钻为 1 个重复,3 次重复。冲洗出的鲜根用吸水纸吸去表面水分并称重鲜重后,放入烘箱 60~80℃ 烘干。

1.2 大田深层土壤 ^{15}N 标记吸收试验

试验设置在大田春灌 2 水区和春不灌水区,按 Menezes^[9]的方法进行深层土壤放置 ^{15}N 标记氮肥处理。 ^{15}N 放置方法是在春灌 2 水区播种后顺小麦播种行用土钻打孔到不同土壤深度(分别为 100、120、140、160、180 和 200cm),利用直径 2cm 的 PVC 管把 ^{15}N 标记 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (含氮 17.07%, ^{15}N 丰度 5.42%)放置到相应土层中,回填土壤以恢复原状。在春不灌水区,于开花前 5d(4 月 25 日)在小麦行上同样进行深层土壤放置 ^{15}N 标记 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 。 ^{15}N 肥料放置位置如图 2 所示,重复 3 次。各处理区分别在小麦拔节、开花和成熟收获期,分层取土(按每 20cm 为 1 层,深 2m)测定土壤水分含量,土壤含水率(%)动态见图 3。

成熟收获期分别对每个处理取植株样(^{15}N 放置两孔中间的植株、孔边植株分开取样),按叶片、茎秆、颖壳和籽粒分开后烘干粉碎,测定籽粒样品 ^{15}N 丰度。 ^{15}N 丰度采用 ZHT-03 质谱计分析测定。

1.3 土柱深层土壤 ^{15}N 标记吸收试验

试验所用原状土柱的制作如下:先从试验区大田依层次(每 20cm 为一层,深 2m)取土,在土柱实验区挖好的土坑中把油毡卷裹在直径 36cm 的特制圆铁皮筒内,直立好后分别按大田各层次土壤容重装土,装好土柱后充分灌水使其自然沉实,备用。设置 3 个层次 ^{15}N 处理,A 处理:深度 100~110cm;B 处理:深度 120~130cm;C 处理:深度 140~150cm,3 次重复。各处理在冬前苗期(播种后 48d)利用土钻打孔和直径 2cm 的 PVC 管,把 1.2g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 肥料(含氮 21.2%, ^{15}N 丰度 24.0%)用少量蒸馏水配制成溶液后注入该层土壤中,填埋好土柱周围土壤以恢复原状。播前浇底墒水(灌水量 11.44L/柱),春灌 2 水处理(拔节水+

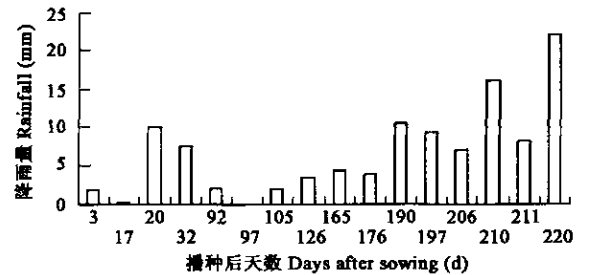


图 1 冬小麦生育期降雨量

Fig. 1 Rainfall in winter wheat growth period

开花水,灌水量合计 10.8L/柱)。基肥用量同前。在土柱里按要求均匀点播 20 粒,播种深度 3~5cm 左右,三叶期定苗 15 株/柱,5 月 29 日成熟收获。

2 结果与分析

2.1 大田小麦根系生长与空间分布

大田生长条件下,冬小麦根系动态测定表明,小麦越冬前根系下扎深度已达 1.0m,开花期最大根深已经超过 2.0m。根系生物量也在开花期达到最大,成熟期根量明显下降。大田小麦各生育时期不同水分处理条件下,根系干重在土体中的空间分布特征均呈现出随着土壤深度增加而减少的趋势(图 4)。

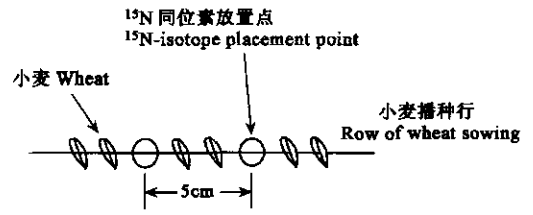


图 2 大田深层土壤放置¹⁵N 同位素示意图

Fig. 2 Sketch map of ¹⁵N-isotope placement in deep soil layer of field

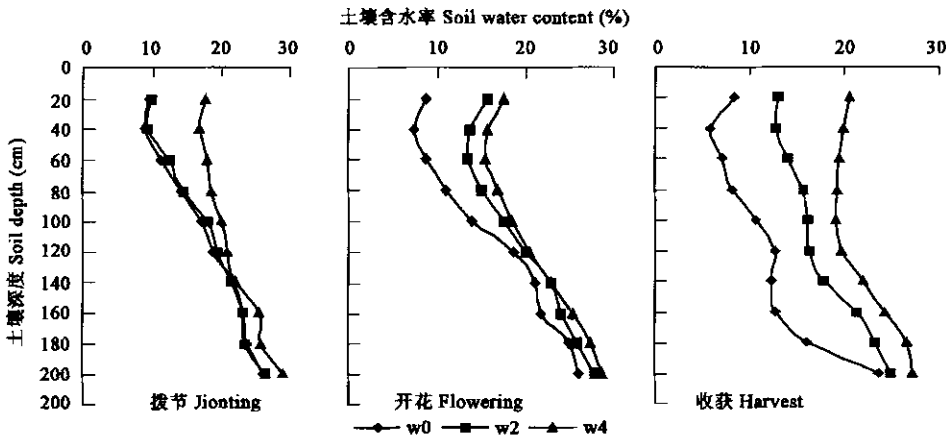


图 3 大田条件下小麦 w0、w2 和 w4 处理不同生育时期的土壤含水率

Fig. 3 Field soil water content of w0, w2 and w4 treatments at different growth stage in wheat

大田小麦成熟收获期,春灌 2 水处理和春不灌水处理各土层根系干重占 2m 土体根量的百分比例与春灌 4 水处理比较,在 80cm 以上土壤中相对低些,但下层土壤中的比例则明显增高,春不灌水处理、春灌 2 水处理和春灌 4 水处理 1.0m 以下土壤中根干重所占百分比例分别为 11.57%、11.05%、6.05%。因此,小麦节水栽培相对于传统的充足水分栽培模式在一定程度上促进了根系下扎,提高了根群中下层根系比例。

2.2 大田小麦对深层土壤放置的¹⁵N 标记氮肥的吸收

成熟收获期的籽粒¹⁵N 同位素丰度测定结果表明,大田春不浇水和春浇 2 水条件下,冬小麦均能够吸收利用不同深层土壤放置的¹⁵N 肥料氮。把植株样品中¹⁵N 丰度与天然丰度的差值记作样品的¹⁵N 原子百分超(以 A‰¹⁵NE 表示,下同)。小麦籽粒 A‰¹⁵NE 总体上表现出,随放置¹⁵N 肥料的土壤深度(120~200cm)增加而降低的趋势(图 5)。

2.3 土柱小麦对深层土壤放置的¹⁵N 标记氮肥吸收

节水省肥栽培条件下,土柱小麦对放置在深层土壤中的肥料¹⁵N 能够吸收利用(表 1),在植株各器官¹⁵N 积累量中籽粒占有最大的¹⁵N 吸收量。小麦植株对土壤深度 100~110cm、120~130cm、140~150cm 不同层次放置的肥料¹⁵N 的回收率(%)分别为 16.26%、7.33%和 4.387%,即随着土壤深度增加,¹⁵N 回收率呈下降趋势。

3 讨论

小麦根系的生长、空间分布和土壤水分密切相关^[8,10,11]。本试验结果表明,小麦根系可深达 2.0m 以下,在节水灌溉处理下(春不灌水、春灌 2 水),1.0m 以下深层根系占总根量的比例(%)明显大于常规灌溉处理(春灌 4 水),这进一步证明,土壤适度水分亏缺可以促进小麦根系下扎并增加下层根系比例^[8,11]。而在节水栽培体系中,适当增加基本苗,增加了根群中初生根数目,

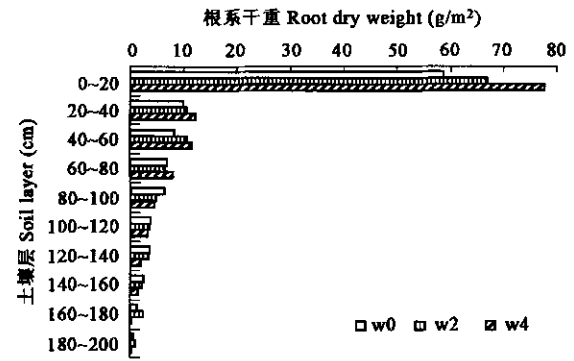


图 4 冬小麦 w0、w2 和 w4 处理收获期根系干重的 2m 土体空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of root dry weight of winter wheat under w0, w2 and w4 treatments in 2m soil body at harvest stage

更有利于深层根系的扩大^[12,13]。节水栽培小麦在生长后期上层土壤处于干旱状态下,可依靠深层根系吸收深层土壤水分来维持生长,深层根系比例增加,可提高小麦对深层土壤水分的利用能力^[7,8],同时也提高了小麦对下层土壤养分(如氮素)的吸收利用能力。本试验结果表明,大田春灌 2 水和春不灌水条件下冬小麦对土壤深层不同部位(100~200cm)放置的¹⁵N 肥料氮均有明显的吸收和利用。同时,通过土柱模拟试验进一步验证了节水栽培小麦对深层氮的利用能力。Menezes 等也曾表明,谷子通过下扎较深的根系可吸收利用 1.0~1.2m 层次土壤中的¹⁵N 肥料氮^[9]。值得注意的是,本试验大田春不灌水区后期 0~80cm 土层处于持续的严重水分亏缺状态(图 3),但植株仍吸收了 1m 以下土层中的¹⁵N,很好地证明了深根系功能的重要性。深层根系对深层土壤水肥资源的利用能力对于节水栽培小麦的高产、高效有着重要的生理意义。

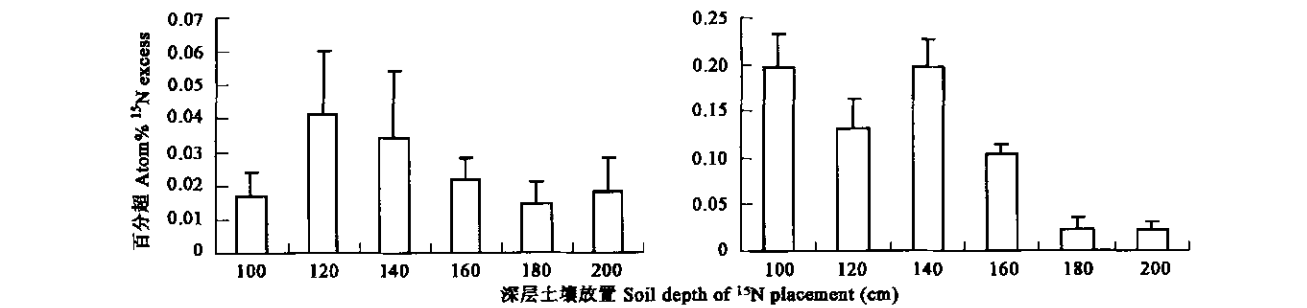


图5 大田 w0 区(A)和 w2 区(B)深层土壤放置¹⁵N 肥料处理下小麦收获期籽粒¹⁵N 原子百分超(A%¹⁵NE)

Fig. 5 Atom % ¹⁵N excess of wheat grain under the field treatment of w0 (A) and w2 (B) deep soil ¹⁵N fertilizer placement at harvest stage

表 1 土柱小麦对深层土壤放置的¹⁵N 标记氮肥的吸收

Table 1 Wheat growth in soil column absorb ¹⁵ N-labeled nitrogen fertilizer placed in deep soil layer				
处理 Treatment	植株器官 Plant organs	¹⁵ N 原子百分超 Atom % ¹⁵ N excess	¹⁵ N 积累量 (mg) ¹⁵ N accumulation	¹⁵ N 回收率 (%) ¹⁵ N recovery rate
A(100~110cm deep soil deposited ¹⁵ N)	叶片 Leaf	0.327±0.020	0.417±0.062	0.81
	颖壳 Glume	0.360±0.018	0.585±0.085	1.13
	茎鞘 Stem	0.380±0.026	0.915±0.064	1.77
	籽粒 Grain	0.459±0.031	6.495±0.756	12.55
	合计 Total		8.410±0.710	16.26
B(120~130cm deep soil deposited ¹⁵ N)	叶片 Leaf	0.173±0.013	0.295±0.087	0.57
	颖壳 Glume	0.201±0.011	0.287±0.015	0.55
	茎鞘 Stem	0.201±0.009	0.472±0.038	0.91
	籽粒 Grain	0.244±0.013	2.738±0.567	5.29
	合计 Total		3.790±0.672	7.33
C(140~150cm deep soil deposited ¹⁵ N)	叶片 Leaf	0.084±0.006	0.087±0.005	0.17
	颖壳 Glume	0.109±0.005	0.130±0.007	0.25
	茎鞘 Stem	0.078±0.003	0.145±0.011	0.28
	籽粒 Grain	0.132±0.003	1.904±0.073	3.68
	合计 Total		2.270±0.088	4.38

不仅如此,节水栽培小麦较强的深层土壤水肥利用能力在冬小麦-夏玉米一年两熟种植体系中还具有其特殊的生态意义。有研究提出,农林(间作)系统中林木植物具有的深根系能够截获、吸收 1 年生农田作物根区以下的土壤养分,通过类似“泵”的抽提(pumping up)作用把吸收的深层土壤养分转移到植株地上部或土壤表层^[14,15]。也有报道提出,树木或灌丛植物的深根系在 1 年生作物根区以下充当着如同“安全网”(safety net)的作用,拦截并吸收农田作物发生淋洗而损失的养分^[16,17]。“养分泵”或“安全网”假说,形象地说明了深根系植物的根系在浅根系植(作)物根区以下所发挥的截获、吸收利用下层土壤养分和防止土壤养分继续向下淋洗损失的作用机制。因此,这样一种机制同样可存在于华北地区冬小麦-夏玉米一年两熟轮作体系中。冬小麦、夏玉米生长季节不同,水热等气候条件不同,根系空间分布也存在明显差异,必然影响到两季土壤水氮的动态和利用。已有报道表明^[6],夏玉米根系分布浅、生育期内雨水多、土壤供氮强度大等因素造成了夏玉米氮肥利用率低,生育期内土壤硝态氮会发生淋溶下移,并在下层土壤中残留积累,且施氮量越多,残留氮累积也越多。如果后茬冬小麦采用常规的高额灌溉方式,这些残留的硝态氮有可能会在小麦季进一步下渗,同时,由于麦收后 2m 土体仍有大量土壤水未被利用,腾出的土壤水库空库容小,容纳不下夏季多余的降水,会进一步加剧汛期水、氮的淋溶,迫使土壤残留硝态氮淋失到地下水中,造成对地下水的污染。小麦节水栽培,一方面由于减少灌溉,充分利用土壤水,麦收后腾出的土壤水库空库容大,能更多地接纳汛期多余的降水,进而更好

地截留夏季未被利用的硝态氮于 2m 土体,减少或避免了水肥的进一步渗漏损失^[7];另一方面,由于较多的根系深扎于 1m 以下,1~2m 深层根系比例较大,较多的土壤养分被利用,特别是下层根系的“抽吸”作用,能将残留于下层土体中的氮素进行再利用,不仅可减少小麦季氮肥施用量,而且减少了玉米季投入的肥料氮损失,可提高周年肥料利用率。如此一年两作,周而复始,伏雨春用,“玉”肥“麦”用,构成了动态的水肥高效利用时空体系。因此,从冬小麦-夏玉米一年两作体系出发,实行冬小麦节水栽培,利用节水小麦深层根系的“养分泵”或“安全网”功能,对于提高两作农田系统水氮利用效率,防止土壤硝酸盐淋洗对地下水污染具有重要生态意义。

References:

[1] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen II. summer maize. *Acta Ecologica Sinica*,2002, **22** (1) : 48~53.

[2] Chen Z M, Yuan F M, Yao Z H, *et al.* Dynamics of nitrogen nitrate move characteristics and leaching in soil body in Beijing Tide-soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,1995,**1**(2):71~79.

[3] Sun Z R, Liu X Q, Yang S C. *Effects of different applied nitrogen rate on the soil below-seep water, yield and quality in wheat, dissertation of fertilization and environment symposium*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,1994. 55~61.

[4] Magdoff F. Understanding the pre-side-dress nitrate test for corn. *J. Prod. Agric.*,1991, **4**: 297~305.

[5] Roth G W and Fox R H. Soil nitrate accumulations following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania. *J. Environ Qual.*, 1990, **19**:243~248.

[6] Wu Y C, Zhou S L, Wang Z M, *et al.* Dyanmics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,**25**(7):1620~1625.

[7] Lan L W, Zhou D X. *Studies on water-saving and high-yielding of winter wheat*. Beijing: China Agricultural University Press, 1995.

[8] Li J M, Zhou D X, Wang P, *et al.* *Principle of cultivation technology of high water and nutrition use efficiency in winter wheat*. China Agricultural University Press,2000.

[9] Romulo S C, Menezes, Gary J. *et al.* Subsoil nitrate uptake by grain Pearl Millet. *Agron. J.*, 1997,**84**:189~194.

[10] Liu D Y. Effects of soil water on roots in winter wheat. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1991,**22**(2):259~364.

[11] Li F M, Guo A H, Luo M, *et al.* Effect of water supply from deep soil on dry matter production of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*,1997,**8**(6):575~579.

[12] Miao G Y, Pan X L. Study on the roots growth of winter wheat in dry land of ocher altiplano. *Acta Agronomic Sinica*, 1989,**15**(2):104~115.

[13] Wu Y C,Zhou S L,Zhang Y P, *et al.* Discussion on the ideal whole plant type for water-saving and high yield in wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, **23**(2):126~129.

[14] Van Noordwijk M, Rooting depth in cropping systems in the humid tropics in relation to nutrient use efficiency. In: J van der Heide ed. *Nutrient management for food crop production in tropical farming systems*. Institute for Soil Fertility, Haren, The Netherlands, 1989. 129~144.

[15] Van Noordwijk M, Lawson G, Soumare A, *et al.* Root distribution of trees and crops: Competition and/or complementarity. In C. K. Ong and P. Huxley(ed.) *Tree-Crop Interactions*. CAB International, Wallingford, UK, 1996. 319~364.

[16] Schroth G. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. *Agrofor. Syst.*, 1995,**30**:125~143.

[17] Rowe E C, Hairiah K, Giller K E, *et al.* Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by ¹⁵N placement at different soil depths. *Agrofor. Syst.*, 1999,**43**:81~93.

参考文献:

[1] 周顺利,张福锁,王兴仁.土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏研究 II.夏玉米.生态学报,2002,**22**(1):79~84.

[2] 陈子明,袁锋明,姚造华,等.北京潮土 NO₃⁻-N 在土体中的移动特点及其淋失动态.植物营养与肥料学报,1995,**1**(2):71~79.

[3] 孙昭荣,刘秀奇,杨守春.不同氮素施用量对土壤下渗水及小麦产量和品质影响,施肥与环境学术讨论会论文集.北京:中国农业科技出版社,1994. 55~61.

[6] 吴永成,周顺利,王志敏,等.华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留.生态学报,2005,**25**(7):1620~1625.

[7] 兰林旺,周殿玺.小麦节水高产研究.北京:中国农业大学出版社,1995.

[8] 李建民,周殿玺,王璞,等著,冬小麦水肥高效利用栽培技术原理.中国农业大学出版社,2000.

[10] 刘殿英.土壤水分对冬小麦根系的影响.山东农业学报,1991,**22**(2):259~364.

[11] 李凤民,郭安红,雒梅,等,土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响.应用生态学报,1997,**8**(6):575~579.

[12] 苗果园,潘幸来,黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究.作物学报,1989,**15**(2):104~115.

[13] 吴永成,周顺利,张永平,等,节水高产小麦理想全株型探讨.干旱地区农业研究,2005,**23**(2):126~129.