植物营养与肥料学报 2010,16(1):82-91
Plant Nutrition and Fertilizer Science

土壤剖面不同土层硝态氮植物利用及运移规律研究

张丽娟[1,2], 巨晓棠[1*], 文宏达[2], 夏晓平[1], 刘 慧[1]
(1 中国农业大学资源与环境学院,北京 100094;2 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071001)

摘要:采用外源标记$^{15}NO_3^-$-N 微注射技术的田间微区试验,研究了我国北方灌溉农作体系中,由于氮肥的高量投入导致作物收获后土壤剖面大量残留 NO_3^--N 对后作的氮素供应潜力及其去向。结果表明,在本试验水氮管理条件下,菠菜(*Spinacia oleracea* L.)对土壤剖面 15、45、75 cm 位置标记氮的利用率分别为 28.2%、22.3%、16.3%;冬小麦(*Triticum aestivum* L.)小偃 54 对相应位置标记氮的利用率分别为 21.8%、17.4%、11.5%,而京 411 为 21.8%、11.6%、7.4%。菠菜对土壤不同层次残留氮的利用率显著大于小麦,小偃 54 显著高于京 411。菠菜的根长密度低于小麦,土壤剖面多数层次两个小麦品种的根长密度差异不显著,小麦的根长密度与相应土层标记硝态氮的利用率呈显著的正相关关系;根干重在土壤剖面多数层次呈现小偃 54 > 京 411 > 菠菜的趋势。生长季结束标记氮发生了向下移动,3 个标记处理分别在土壤剖面 60—80、60—80、80—100 cm 出现积累峰;但菠菜 15 cm 位置收获后整个剖面的%Ndff 值均很低,标记氮在剖面中几乎没有积累峰;不同标记位置的残留氮均发生向上运移,上移距离分别为 15、45、35 cm,残留氮标记的层次越深,其在土壤中再分布能力愈弱,残留越集中。

关键词:^{15}N;小麦;菠菜;根系;累积硝态氮;植物利用
中图分类号:S153.6+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)01-0082-10

Utilization of residual nitrogen by plants and its movement in different soil layers

ZHANG Li-juan[1,2], JÜ Xiao-tang[1*], WEN Hong-da[2], XIA Xiao-ping[1], LIU Hui[1]
(*1 College of Resources and Environment of China Agricultural University, Beijing 100094, China;*
2 College of Resources and Environmental Sciences of Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: High input of nitrogen fertilizer caused continuous nitrogen surplus in agro-ecosystem. There were large amount of residual NO_3^--N in soil profile after crop harvest in irrigation agricultural system of North China. Nevertheless, the fate and supply potential of the residue NO_3^--N for succession crops had been unclear. Field micro-plot experiment and technique of external injection of labeled $^{15}NO_3^-$-N (labeled-N) were used. The results showed that the recovery of labeled NO_3^--N in 15 cm, 45 cm and 75 cm soil profile by spinach (*Spinacia oleracea* L.) were 28.2%, 22.3% and 16.3% respectively. Those by wheat (*Triticum aestivum* L.) Xiaoyan 54 in corresponding positions were 21.8%, 17.4% and 11.5%, while those by Jing 411 were 21.8%, 11.6% and 7.4% respectively, the recovery of labeled NO_3^--N in different soil layers by spinach was significantly higher than that by wheat, furthermore, the recovery of labeled NO_3^--N by Xiaoyan 54 were significantly higher as compared with Jing 411. The root length density of spinach was lower than that of wheat, and no significant difference of root length density was found in the two wheat varieties in most soil layers. The crop root length density in corresponding soil layers had significant positive correlation with the recovery of labeled nitrate-N; the dry root weight in treatments appeared the tendency with Xiaoyan 545 > Jing 411 > spinach in most soil layers. Labeled NO_3^--N moved downwards at the end of growing season. The accumulated apices were appeared in soil layer with 60-80 cm、60-80 cm、80-100 cm respectively in threelabled experiments. But the%Ndff values of spinach at 15 cm po-

收稿日期:2008-09-22　　**接受日期**:2009-05-28
基金项目:国家自然科学基金项目(编号 30571110);河北省自然基金项目(2006000491);科技部'863'项目(编号 2008AA06Z315)资助。
作者简介:张丽娟(1964—),女,河北正定人,教授,博士,主要从事农田生态系统氮素行为及去向研究。
* 通讯作者 Tel:010-62893459,E-mail:juxt@cau.edu.cn

sition in the whole profile were all low and the lablednitrogen had scarcely no accumulated apices at the profile. At the same time, the residue nitrogen in different soil layers was all upward migration with 15 cm、45 cm and 35 cm respectively. The deeper of labeled residue nitrogen layer, the weaker of redisbution ability in soil profile and the residue nitrogen was more concentrated.

Key words: ^{15}N; wheat; spinach; roots; accumulated nitrate; utilization by plants

自 80 年代以来，中国农田生态系统中氮素总体上处于盈余状态，而且呈现持续增长趋势[1-2]。我国北方灌溉农作体系中，作物收获后土壤剖面中大量残留 NO_3^--N[3]。山东省惠民县小麦—玉米田、大棚蔬菜和果园土壤硝态氮累积的研究结果表明，三种体系 0—90 cm 土层硝态氮的累积量分别为 N 217、1173、613 kg/hm^2；90—180 cm 的累积量为 N 263、1031、976 kg/hm^2[4]。对近 10 年来发表的关于土壤剖面硝态氮累积的 120 篇文献 800 余条记录进行的综合分析表明，0—100 cm 土层 NO_3^--N 的累积量平均达到 N 200 kg/hm^2 左右，菜田达到 N 700 kg/hm^2[5]。累积的硝态氮如不及时被作物吸收利用，在气候比较湿润和大量灌溉条件下，将发生向下移动甚至淋失，进一步迁移至地下水[4,6-7]。因此，研究农田土壤剖面累积 NO_3^--N 对后作的氮素供应潜力及去向，对减少硝酸盐淋洗损失及实现土壤中过量氮素的再利用具有重要的理论与现实意义。

土壤剖面 NO_3^--N 的生物有效性及去向研究一直受到国内外学者的关注[8-10]。土壤剖面中累积的 NO_3^--N 是不容忽视的土壤氮素资源。Cassman 等[11]认为，土壤的天然氮供应量有着很高的氮肥替代值；土壤剖面中累积的 NO_3^--N 显著影响氮肥肥效[12]。许多学者对植物能够利用的 NO_3^--N 残留土层深度和程度进行了探索。Zinati 等[13]在田间微区试验中，将标记^{15}N 注射到 30、60、90 cm 深度，发现标记的深度对生物量及氮吸收均无影响；但标记^{15}N 吸收易受标记层位影响，甜菜对土壤标记^{15}N 的利用率分别为 12.5%、5.7%、4.6%。玉米对注射到 15、45、75 cm 标记^{15}N 的利用率分别为 22.4%、13.8% 和 7.8%；茄子则分别为 7.9%、4.9% 和 2.7%[14]。说明随着土壤剖面深度加深，土壤累积 NO_3^--N 的生物有效性随之降低。剖面不同部位残留 NO_3^--N 的迁移深度有所差异。巨晓棠等[15]研究表明，在华北平原北部山前冲积平原区，前茬小麦累积于 60—80 cm 土壤剖面的残留 NO_3^--N，在夏玉米季结束后 NO_3^--N 峰迁移至 140—160 cm 处。Villar-Mir 等[16]发现，在西班牙东北部的玉米体系存在氮盈余，作物生长期间土壤 NO_3^--N 发生向下的运移，收获后土壤底层 80—100 cm 出现 NO_3^--N 的累积，进而增加了冬季 NO_3^--N 淋洗的风险。

蔬菜和禾谷类作物的根系分布不同，在 0—30 cm 耕层土壤中，蔬菜作物的根长密度主要在 2～4 cm/cm^3 范围内[17-18]，比禾谷类作物根长密度要低得多。因此，蔬菜和大田作物对土壤剖面各土层所累积硝态氮的利用情况及其差异值得进一步研究。为此，以北方半干旱湿润区的潮土为研究对象，以冬小麦（*Triticum aestivum* L.）和菠菜（*Spinacia oleracea* L.）作为粮田和蔬菜种植体系的指示作物。将^{15}N 标记的硝态氮注射于土壤剖面不同位置，研究两种越冬作物对土壤剖面不同位置累积硝态氮的利用情况和累积硝态氮在土壤中的移动，以便进一步明确这两种种植体系中所累积硝态氮对环境的影响。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于北京市海淀区东北旺乡的中德合作项目试验基地（N 39°56′，E 116°20′），属于典型的半干旱季风气候区。地下水埋深为 15 m，降水主要分布在 6～8 月。试验期间降水量和历史上同期降水量的分布见图 1。小麦试验期间 2002 年 10 月至 2003 年 6 月降水量为 242 mm，比 1952～1996 年该期间平均降水量高 86 mm；菠菜试验期间 2002 年 10 月至 2003 年 4 月降水量为 90 mm，比 1952～1996 年该期间平均降水量高 21 mm。属较湿润年份。

试验地土壤为山前平原冲积性潮土，各土层土壤基础物理化学性质见表 1。按北京地区肥力分级标准[19]，该试验地属高肥力土壤。

1.2　试验方案

1.2.1　试验设计与布置　试验采用复因素试验设计。主处理为标记位置，设 3 个^{15}N 标记位置，即距地表 15、45、75 cm；副处理为作物种类及品种，即菠菜和小麦，其中小麦 2 个品种（小偃 54 和京 411）。共计 9 个处理，每个处理重复 3 次。微区面积为 1 m ×1 m，小区之间间隔为 1 m，以防止小区之间相互影响。由于试验地块前几季种植的作物和施肥等诸

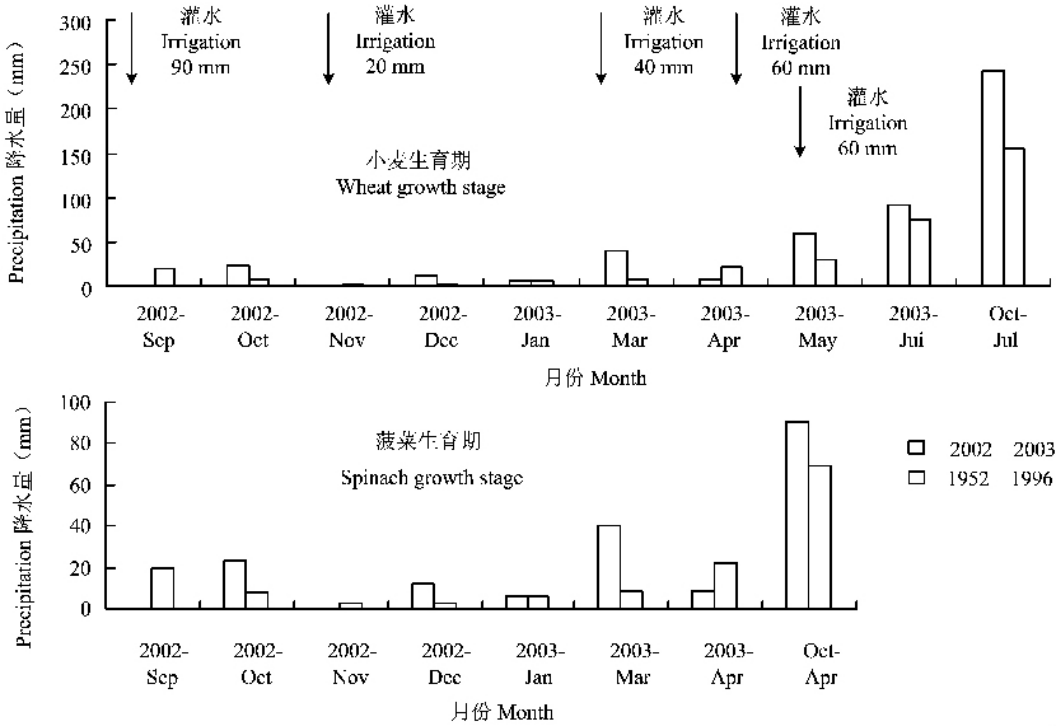

图1 作物生育期间的降水量和1952～1996该期间降水量的比较

Fig.1 Comparison of precipitation in experiment period in 2002–2003 with same period of average precipitation from 1952 to1996

表1 田间试验土壤的基础理化性质

Table 1 Basic properties of the field experimental soil

土层深度 Soil layers (cm)	pH (H_2O) (1∶2.5)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 NH_4OAc-K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/m^3)	土壤质地(%) Texture Sand/Silt/Clay
0—20	7.73	22.5	1.17	5.8	8.8	26.7	143.5	1.34	27/57/16
20—40	7.71	21.2	1.08	3.7	16.1	21.2	115.9	1.44	25/58/17
40—60	7.74	10.9	0.85	5.2	8.1	10.1	104.0	1.52	22/60/18
60—80	7.78	7.8	0.64	3.9	10.4	2.1	80.4	1.49	31/55/14
80—100	7.76	6.5	0.38	5.6	11.6	0.8	56.7	1.54	25/59/16

因素一致，试验微区面积较小，因而土壤的方向性渐变不予考虑。田间试验布置采用作物种类或品种为区组，区组内3个^{15}N标记位置共计9个微区，随机排列。同时设置2 m×2 m的小麦和菠菜的动态取样区，作物品种、播种量及施肥方法均同^{15}N微区，但不作^{15}N标记，也重复3次，共计9个小区。

1.2.2 ^{15}N注射方法及耕层施肥 标记源为丰度5.26%的$K^{15}NO_3$（上海化工研究院提供）。用量为每小区外源^{15}N的标记量以0—30、30—60、60—90 cm土层的累积硝态氮按N 100 kg/hm^2计算，即每小区标记量为N 6.4 g。选择在3个土层各自的中间位置即15、45、75 cm处进行^{15}N标记。

标记方法：距地表15 cm处理微区的^{15}N在小麦和菠菜出苗后10 d，垂直用土钻分别在作物行间打4个孔至土层的15 cm处，每孔分别放置一内径0.5 cm、长度15 cm的PVC管，把溶于10 mL水的4.56 g硝酸钾注射到里面，再用40 mL水分4次冲洗用具。然后把土钻中的土按原状回填压实，用标竿标记注射位置。其他2个处理微区的^{15}N标记方法相同，只是打孔深度分别至土层的45和75 cm处。^{15}N的标记的位置见图2。

每个^{15}N微区在作物种植前施入氮、磷、钾肥，氮肥为尿素（含氮量46%），磷肥为重过磷酸钙（含46% P_2O_5），钾肥为硫酸钾（含50% K_2O）。氮肥施用量为N 100 kg/hm^2，其中基肥为总用量的1/2，2003年小麦起身时追施其余的1/2；磷、钾肥全部作

基肥施用,P_2O_5、K_2O 用量各分别为 60 kg/hm^2。基肥与 0—20 cm 耕层土壤混合耙平,追肥结合起身期浇水均匀施入。

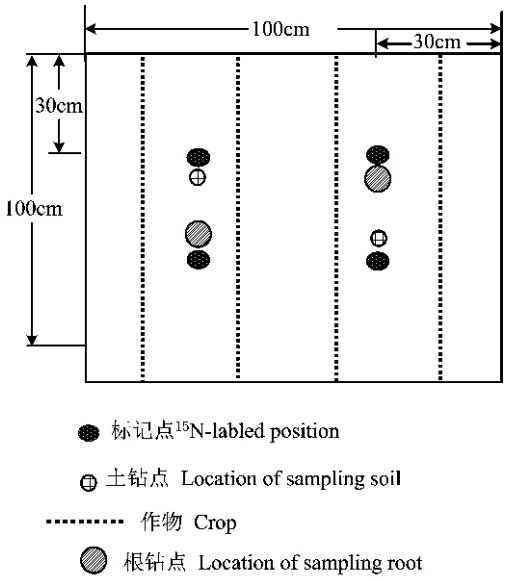

图 2　^{15}N 微区种植、标记、取样示意图

Fig.2　The sketch map of planted, labeled, sampled points in ^{15}N microplot

1.2.3　种植方式和田间管理　供试菠菜品种为菠杂 10,播种量为 75 kg/hm^2;小麦品种小偃 54 和京 411,播种量为 195 kg/hm^2。两种作物均采用条播,行距为 20 cm,每微区 4 行(图 2)。作物生育期间不定期收集小麦、菠菜的落叶,烘干保存。4 月 26 日收获菠菜,6 月 16 日收获小麦。

2002 年 9 月 10 日灌底墒水 90 mm,10 月 1 日播种,10 月 6 日出苗。10 月 16 日进行微区的^{15}N 标记。11 月 20 日浇冬水 20 mm;2003 年 3 月 5 日浇返青水 40 mm,同时追施氮肥;4 月 10 日进行拔节期灌溉 60 mm;5 月 14 日浇扬花水 60 mm。菠菜和小麦的施肥和灌水管理相同,但因菠菜在 4 月 26 日收获,故 5 月 14 日 60 mm 灌水未进行。

1.2.4　样品采集　播种前采集试验地 0—200 cm(以 20 cm 为间隔)土壤样品,测定土壤基本理化性质及土壤的 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量。

^{15}N 微区植株样品的采集:4 月 26 日收获菠菜,微区植株全部采收。6 月 16 日收获小麦,分秸秆,穗收获。采收后,菠菜立即在 105℃下杀青 30 min,70℃下烘干称重。小麦在外风干一段时间后,70℃下烘干。烘干后分子粒、秸秆称重。同时把生育期间收集的小麦、菠菜的落叶分别混合。把每个处理采集的样品全部磨碎过 0.25 mm 筛,然后用四分法取分析样,用于测定植株含氮量及^{15}N 丰度。

^{15}N 微区土壤样品采集:2003 年 4 月 26 日(菠菜)、6 月 16 日(小麦)收获后在两行植物中间距标记点 5 cm 处分别采集。每个微区的 4 个标记点选取 2 个标记点,以 20 cm 为间隔采集 0—200 cm 的土样,避免各点间和各层间的污染,具体位置见图 2 的土钻点。所采集样品用于测定土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N、土壤水分及土壤全氮的^{15}N 丰度。

^{15}N 微区根系样品采集:植株收获后根系样在距离^{15}N 标记点 5 cm 处,利用直径 8 cm 的根钻按 15 cm 为间隔采集根系样品(图 2)。小麦微区采集深度为 0—150 cm 共计 10 层;菠菜微区采集深度 0—105 cm 共计 7 层。

动态取样区的土壤样品采样:分别于小麦播前、苗期、分蘖期、返青期、起身期、拔节期、孕穗期、杨花期、灌浆期、成熟期,以 20 cm 为间隔采集 0—100 cm 土壤样品;菠菜动态区土壤样品自播种至收获与小麦动态区同步采集。每小区采两钻,同层混合。所采集样品全部用于测定土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 及土壤水分。

1.3　测定项目及方法

土壤有机质、速效磷、速效钾采用常规方法测定;土壤 pH 采用 1∶2.5 的土水比制备土壤悬液,pH 计测定;土壤颗粒分析采用美国制测定;容重采用环刀法多点采样测定;土壤无机氮采用 0.01 mol/L $CaCl_2$ 浸提,流动分析仪(TRAACA 2000,德国)测定 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量;土壤全氮测定先通过 5%的高锰酸钾及还原铁粉还原硝态氮后,再按常规凯氏法定氮;植物全氮测定采用普通凯氏法;土壤和植株的^{15}N 丰度测定将凯氏法定氮后的蒸馏液酸化后,浓缩至 3 mL,用 MAT－251(Finnigan,德国)质谱仪测定。

各土层根系的测定:将根钻采集的样品置于 0.25 mm 筛内用水冲洗,挑出根系,采用交叉网格法[20]测定样品的总根长,计算根长密度,同时测定根干重。

土壤各层全氮%Ndff(土壤残留的氮来源于标记氮的比例)＝土壤各层全氮的^{15}N 原子百分超/标记的^{15}N 原子百分超 ×100%

植物的%Ndff(植物吸收的氮来源于标记氮素的比例)＝植物中^{15}N 原子百分超/标记的^{15}N 原子百分超×100%

土壤残留氮的利用率(%)＝植株的%Ndff ×植

株的吸氮量(N g/plot)/标记^{15}N 的量(N g/plot) × 100

试验数据根据 SAS 软件(6.12 版)中的 ANOVA 程序(LSD 检验 $P < 0.05$)和 Excel 中的 T 检验进行统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 作物对土壤剖面不同层次标记^{15}N 的吸收

随着^{15}N 标记层次加深,作物地上部对标记^{15}N 吸收量明显递减,3 个标记处理间表现出显著差异(表 2)。菠菜对不同层次标记^{15}N 吸收量显著高于小麦,说明在本试验条件下菠菜吸收土壤剖面标记硝态氮的能力比小麦高。菠菜和小麦对土壤剖面标记^{15}N 总吸收量具有显著差异,导致对土壤标记氮的利用也存在极显著差异。作物对土壤剖面不同位置标记氮的利用率随土壤剖面深度加深而显著降低。菠菜对土壤剖面 15、45、75 cm 位置标记氮的利用率分别为 28.2%、22.3%、16.3%;小麦品种小偃 54 对相应位置标记氮的利用率分别为 21.8%、17.4%、11.5%,而京 411 为 21.8%、11.6%、7.4%。菠菜对土壤标记氮的利用率平均为 22.3%,而小麦两品种分别为 16.9% 和 13.6%,菠菜显著高于小麦($P < 0.05$);小麦 2 个品种之间也表现出显著差异,小偃 54 明显高于京 411,说明小偃 54 具有较强的氮利用能力。作物对土壤剖面不同位置标记氮的利用率差异也达到极显著水平($P < 0.01$),但作物与标记位置间无交互作用。

2.2 作物根系在土壤中的分布

比较收获后作物的根长密度和根干重(图 3)可发现,随着土壤层次加深根长密度和根干重依次递减。在土壤剖面 60—75 cm 层次,菠菜与小麦的根长密度无显著差异,而其他层次则显著低于小麦;小麦 2 个品种小偃 54 和京 411 在 0—15 和 30—45 cm 两个层次,表现为小偃 54 显著高于京 411,但其他层次差异不显著。菠菜根干重从总体上看与小麦无显著差异,在 0—105 cm 范围内虽然从数值上多数层次小偃 54 高于菠菜,但均未达显著水平;与京 411 相比,除 45—75 cm 区域外其他层次均表现为京 411 明显大于菠菜。75—135 cm 区域小偃 54 明显大于京 411,可见小偃 54 的中下层根系较京 411 发达。

2.3 作物生长期间土壤剖面水分动态变化

作物生育期间土壤剖面 0—100 cm 中的水分动态可以看出(图 4),苗期至冬前作物根系较浅而需水量少,三种作物对土壤表层水分消耗情形稍有不同。初春累积降水 33.5 mm(12 月~3 月中旬)及返青水,0—40 cm 土层水分状态回复到播前水平,随后剖面中水分消耗自上而下逐渐加剧,拔节水并没有对剖面水分状况有所改善。小麦扬花期灌溉使京 411 0—60 cm、小偃 54 0—80 cm 土层水分明显升高,此后至收获前土壤剖面水分一直处于持续耗竭状态,收获前 6 月 4 日和 6 月 9 日的降雨 24.6 mm 和 22.7 mm,0—60 cm 土层水分又明显回升。

表 2 作物不同标记处理地上部分的^{15}N 吸收量及利用率

Table 2 ^{15}N uptake and recovery of different crops shoots in different labeled depth

标记深度 Depth of labeled layers (cm)	^{15}N 吸收量 ^{15}N uptake (g/m^2)			标记氮的利用率 Recovery of labeled nitrate(%)		
	菠菜 Spinach	小麦 Wheat		菠菜 Spinach	小麦 Wheat	
		小偃 54 Xiaoyan 54	京 411 Jing 411		小偃 54 Xiaoyan 54	京 411 Jing 411
15	2.80 a	2.18 a	2.18 a	28.2 a	21.8 a	21.8 a
45	2.23 b	1.74 b	1.16 b	22.3 b	17.4 b	11.6 b
75	1.63 c	1.15 c	0.74 c	16.3 c	11.5 c	7.4 c
均值 Mean	2.22	1.69	1.36	22.3	16.9	13.6
因素显著性 Factor significance						
作物 Crop	* *			*		
品种 Cultivar	*			*		
标记 Labeled	* *			* *		
Crop × Labeled	ns			ns		

注(Note):数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters means significant at 5% level;* $P < 5\%$;* * $P < 1\%$;ns—No significant.

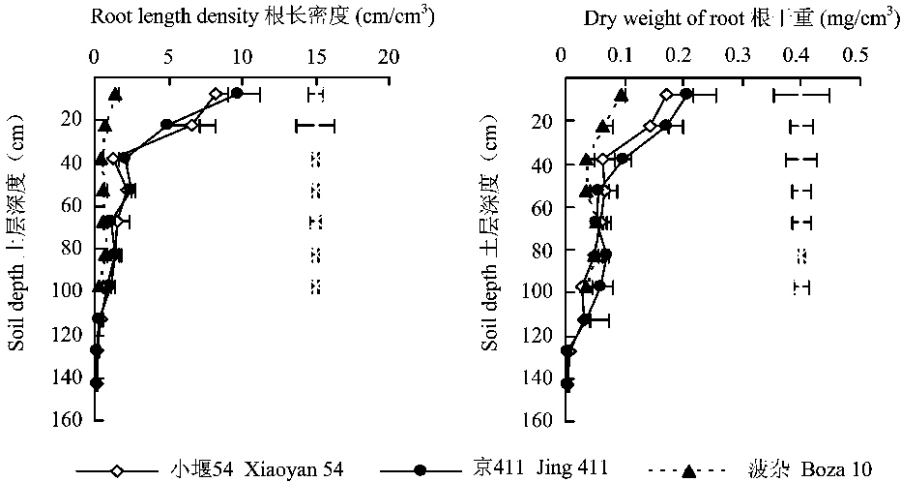

图 3　收获后作物根系在不同土层的分布情况

Fig.3　Roots distribution at different soil layers after harvest

纵观作物整个生育期土壤水分的变化,可以说明两点:第一,在小麦、菠菜从播种到收获 255 和 205 d 之内,没有明显的自由水流通过土壤剖面 100 cm 深处,因而在作物生长季内也不会发生 NO_3^--N 的强烈淋洗。第二,由于 2 个小麦品种植株形态的差异,小偃 54 的直立与京 411 的披散差异明显,因而田间覆盖度有所不同,所以土面蒸发也会有差异,最终影响作物的田间蒸散量。

2.4　土壤剖面标记氮的垂直运移

小麦生长季结束时,15 cm 位置标记氮在土壤剖面 60—80 cm 土层有 ^{15}N 的积累峰(图 5),2 个小麦品种小偃 54 和京 411 的积累峰的%Ndff 值分别为 1.5 和 4.1;菠菜处理在剖面中几乎没有积累峰,而且整个剖面的%Ndff 值均很低。如果以标记氮出现的积累峰位置作为此种溶质运移距离,标记点所处的位置与积累峰所处的位置的间距作为标记氮下移的距离,小麦处理 15 cm 位置的标记氮在土壤中下移了 65 cm。

菠菜和小麦 45 cm 标记氮均上移至土壤表面,下移到 80 cm 土层,上下运移距离均为 45 cm;两种作物都在 60—80 cm 处出现累积峰,累积峰值小麦显著大于菠菜,小麦 2 个品种则为京 411 大于小偃 54。

两种作物 75 cm 深度标记氮在土壤中上下移动距离相似,上移至 40 cm,上移了 35 cm;标记氮未发生明显向下运移,仅以标记区域为中心向下扩散了 25 cm 左右;积累峰均出现在土壤剖面 80—100 cm 处,但是小麦品种京 411 处理的峰值明显大于菠菜处理的峰值。

3　讨论

3.1　两种作物对土壤剖面硝态氮利用的差异

菠菜和小麦对土壤累积硝态氮利用率具有显著差异,在本试验条件下,菠菜表现出较强的吸收土壤剖面标记氮的能力。植物的生长速率是调控离子吸收的重要因素[21],作物的氮需求决定着根系吸收[22]。小麦 2 个品种小偃 54、京 411 在播种~拔节、拔节~开花、开花~成熟 3 个生育时期的生长速率平均每株分别为 5.2、21.8、22.5 mg/d[23];而与小麦相对应的前两个生育时期,菠菜的生长速率每株则分别为 39.1、104.3 mg/d[24]。小麦地上部相对生长速率与 NO_3^--N 吸收量正相关[22]。因此,在相同供氮量的条件下,菠菜对土壤氮素的需求要大于小麦。菠菜根系的盐基代换量一般为 530 mmol/kg,root,而小麦为 142 mmol/kg,root[25],根系盐基代换量大小与根系吸收养分能力呈正相关,菠菜根系的盐基代换量比小麦要高,菠菜吸收养分的能力强。据陈雨海等[26]研究,小麦菠菜间作体系中,小麦对耕层施入的 ^{15}N 的利用率为 21.8%,间作菠菜为 32.2%,与本试验 15 cm 标记的结果较为吻合。此外,北京地区通常越冬菠菜采收上市在返青后 30~40 d[27],即 3 月下旬至 4 月初,此时正值菠菜营养生长盛期,尚未抽薹,而本试验因考虑与小麦生育时期的匹配,菠菜采收期较晚。4 月 26 日采收时植株高度已达 80 cm 以上,几乎超过小麦,并且开始抽薹进入生殖生长期。因此,本试验中菠菜对剖面标记氮的利用与蔬菜难以利用土壤 30 cm 以下氮素的传统观点[28]有所不同。由于试验采取统一的水氮管理,耕层氮肥

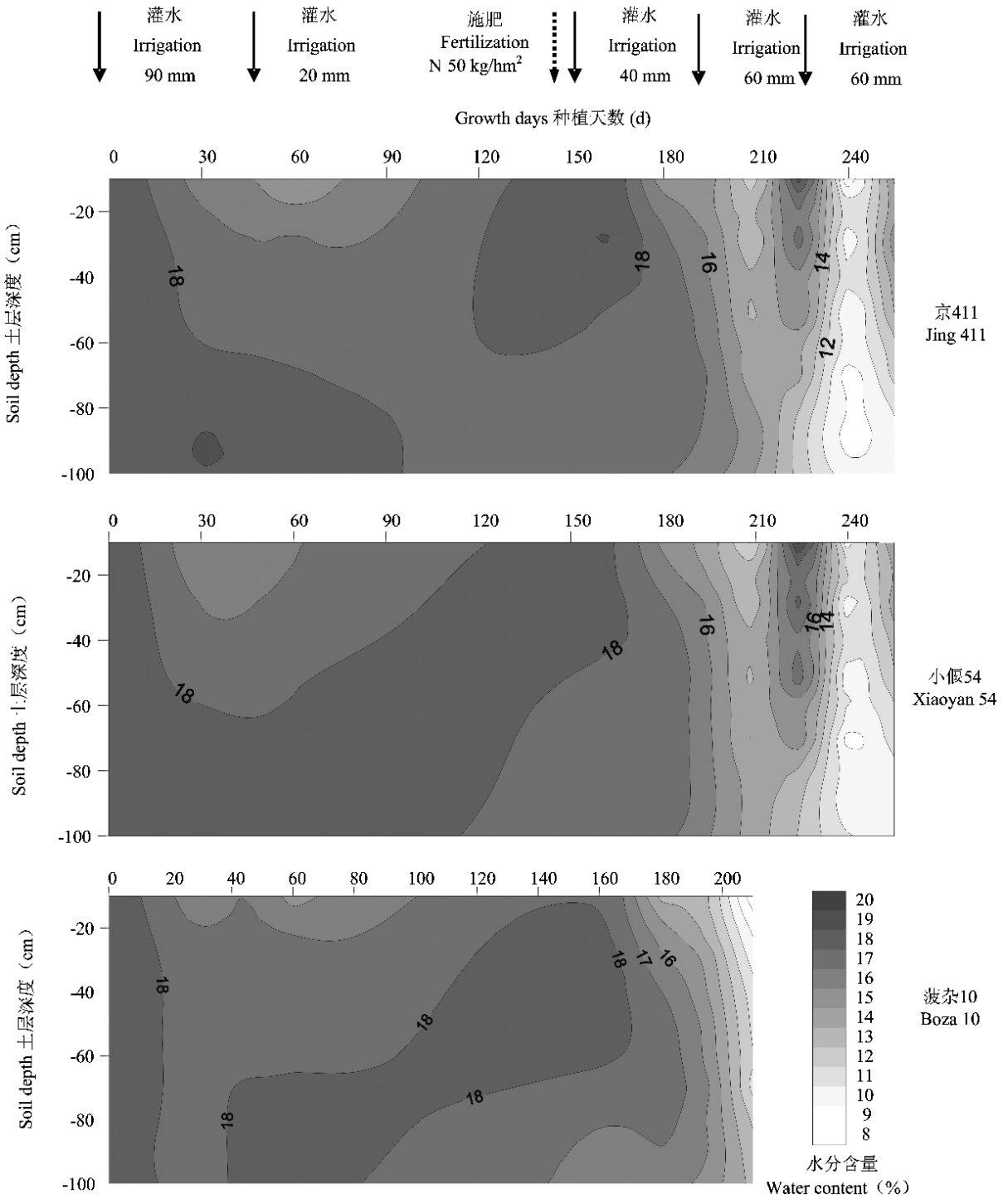

图4 作物生育期间土壤剖面中水分的动态变化

Fig.4 Dynamics of soil water content in 100 cm soil profile in growth season

用量为 N 100 kg/hm²，显著低于一般菜田推荐施肥量[29-30]。同时标记前土壤剖面残留氮含量显著低于一般的蔬菜地，喜水肥的菠菜对标记于土壤剖面不同层次的^{15}N吸收强烈；而且，菠菜本身累积硝态氮的能力远高于小麦[31]，因此菠菜对各标记层氮的利用率也较小麦高。在蔬菜种植体系中适当减少氮肥的投入，在保证高产的前提下可以充分挖掘土壤剖面中累积氮素的潜力[32]，减少植株体内硝酸盐奢侈积累[33]，降低土壤剖面 NO_3^--N 数量，从而防止 NO_3^--N 向深层迁移及累积。

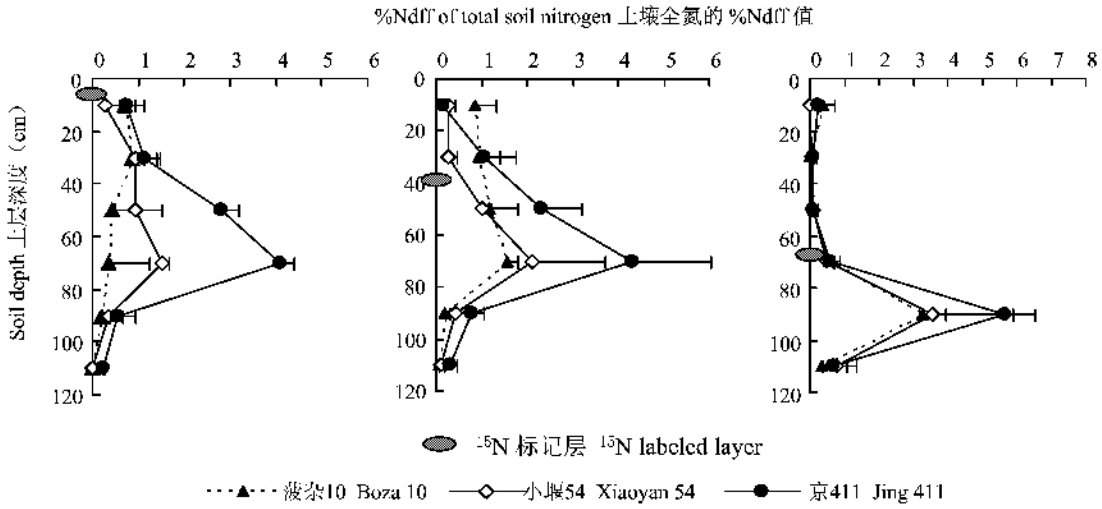

图 5　距标记点水平距离 5 cm 土壤各层全氮的%Ndff 值

Fig.5　%Ndff of total soil nitrogen in different layers at 5 cm of horizon distance of labeled point

两个小麦品种吸氮量是小偃 54 > 京 411,对标记^{15}N 吸收量 3 个层次的平均值也表现为小偃 54 大于京 411,说明小偃 54 具有较强的对土壤不同层次标记氮利用的能力。其原因可能是由于品种间氮营养特性差异所致[34-35]。根据童依平等[23]研究,在低量供氮时,小偃 54 具有较大的根系总吸收表面积和活跃吸收表面积,NO_3^--N 吸收动力学参数(最大吸收速率和亲合力)以及根酸分泌量等都明显优于其他品种。本试验在低量氮肥投入前提下,剖面多数层次根长密度均表现为小偃 54 大于京 411 的趋势,从而导致两品种氮素吸收效率具有较大差异,此结果与童依平试验结论相一致[36]。

作物对土壤剖面不同位置标记氮的利用率差异也达到极显著水平($P < 0.01$)。同一作物对上层位置的累积硝态氮的利用率大于下层,随着土层位置的加深,利用率降低。这主要与作物根系在不同土层的分布有关。一般田间作物在表土与底土层之间具有典型的根密度梯度,根长密度的大小也决定了作物对根系所在土层的硝态氮的利用程度,作物的根长密度与相应土层标记硝态氮的利用率呈显著的正相关关系(图 6)。

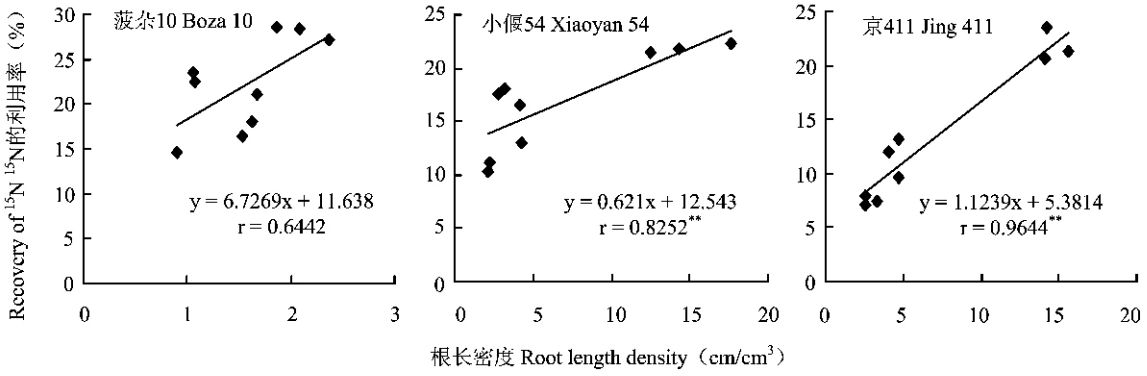

图 6　土壤标记硝态氮的利用率与作物根长密度的相关性

Fig.6　The relationship between recovery of ^{15}N and root length density

3.2　存在于不同土层硝态氮的运移及残留规律

土壤残留氮除被作物吸收外,还有一部分继续在土壤中残留和移动[37]。试验期间降水量高于 1952～1996 年同期降水量(图 1),属较湿润年份。

但从生育期间 0—100 cm 土壤水分的动态来看(图 4),随时间推移,由于受作物耗水及土面蒸发的影响,土壤剖面水分总体趋势表现为波浪式逐步耗竭。而且因作物根系的吸水作用,导致下层水分耗

竭严重，没有明显的自由水流通过土壤剖面 100 cm 深处，因而在作物生长季内也不会发生 NO_3^--N 的强烈淋洗，标记硝态氮没有随水分质流迁移出根区。

收获后标记氮在剖面各层的分布存在显著差异，无论是土壤剖面上部的残留氮还是下部的残留氮，在土壤水分的作用下，都发生了向下移动，且在某一位置形成累积峰。小麦两个品种 15、45 cm 标记氮的积累峰均出现在土壤剖面 60—80 cm 处，这与返青期、扬花期的两次灌水具有直接关系，使标记硝态氮随水分质流发生了明显迁移(图 4)。菠菜 15 cm 位置收获后标记氮在剖面中几乎没有积累峰，而且整个剖面的%Ndff 值均很低，45 cm 标记氮的积累峰也出现在土壤剖面 60—80 cm 处。两种作物 75 cm 标记氮未发生明显运移，仅以标记区域为中心向下扩散了 20 cm 左右，积累峰出现在土壤剖面 80—100 cm 处。

由于作物根系的吸水作用，导致下层水分向上移动，不同标记位置的残留氮均发生向上运移。15、45 cm 标记氮在土壤中上移至表层，上移距离分别为 15、45 cm；75 cm 深度土壤标记氮上移至 40 cm，上移了 35 cm。说明残留氮标记的层次越深，其在土壤中再分布能力就越弱，残留越集中。

参考文献：

[1] 朱兆良，孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京：中国环境科学出版社，2006.
Zhu Z L, Sun B. The alleviating strategies of agricultural non-point source polll in China[M]. Beijing: China Environment Sciece Press, 2006.

[2] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China[J]. Pedosphere, 2005, 15(3): 347-355.

[3] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, Roelcke M. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. Amibo, 2004, 33(5): 330-305.

[4] Ju X T, Kou C L, Zhang F S *et al*. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environ. Poll., 2006, 143: 117-125.

[5] 王智超. 农田土壤硝态氮累积及干湿交替过程的影响[D]. 北京：中国农业大学硕士学位论文，2006.
Wang Z C. Effects of nitrate accumulation and drying wetting alternation on farm soil[D]. Beijing: Ms thesis of China Agricultural University, 2006.

[6] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agric., Ecosyst. Environ., 1996, 59: 223-231.

[7] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-examples from central Europe and China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2000, 57: 33-46.

[8] 刘宏斌，李志宏，张云贵，等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学，2004，37(5)：692-698.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, Zhang W L *et al*. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(5): 692-698.

[9] Macdonald A J, Poulton P R, Stockdale E A *et al*. The fate of residual ^{15}N-labelled fertilizer in arable soil: Its availability to subsequent crops and retention in soil[J]. Plant Soil, 2002, 246: 123-127.

[10] Kuldip K, Goh K M. Recovery of ^{15}N-labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial ryegrass crops and residual NO_3^--N recovery by succeeding wheat crops under different crop residual management practices[J]. Nut. Cycl. Agroecosys., 2002, 46: 123-130.

[11] Cassman K G, Achim D, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management [J]. Ambio, 2003, 31: 132-140.

[12] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S *et al*. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects[J]. Soil Sci. Soc. J. Am., 2002, 66: 544-553.

[13] Zinati M, Christenson D R, Harris D. Spatial and temporal distribution of ^{15}N tracer and temporal pattern of N uptake from various depths by sugarbeet[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 2001, 32(9-10): 1445-1456.

[14] Ju X T, Gao Q, Christie, P *et al*. Interception of residual nitrate from a calcareous alluvial soil profile on the North China Plain by deep-rooted crops: A ^{15}N tracer study[J]. Environ. Poll. 2007, 146: 534-542.

[15] 巨晓棠，刘学军，张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO_3^--N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报，2003，40(4)：538-546.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Accumulation and movement of NO_3^--N in soil profile in winter wheat summer maize rotation system[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 538-546.

[16] Villar-Mir J M, Villar-Mir P, Stockle C O, Ferrer F *et al*. On farm monitoring of soil nitrate nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley[J]. J. Agron., 2002, 94: 373-380.

[17] Steingrobe B, Schenk M K. A model relating the maximum nitrate inflow of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) to the growth of roots and shoots [J]. Plant Soil, 1994, 162: 249-257.

[18] Smit A L, Booij R, Werf A V D. The spatial and temporal rooting pattern of Brussels sprouts and leeks[J]. Neth. J. Agric. Sci., 1996, 44: 57-72.

[19] 刘宝存，孙明德，吴静. 北京郊区粮田土壤养分与施肥[J]. 北京农业科学，1999，17(6)：30-34.
Liu B C, Sun M D, Wu J. Soil nutrient and fertilization of farmland in suburb of Beijing[J]. Beijing Agric. Sci., 1999, 17(6): 30-34.

[20] Tennant D A. Test of a modified line interest method of estimating root length[J]. J. Ecol. 1975, 63: 995-1001.

[21] 马期纳 H (曹一平，陆景陵译). 高等植物营养的矿质营养[M]. 北京：北京农业大学出版社，1991. 29-33.
Masina H (Cao Y P, Lu J L Trans.). The mineral nutrition of high plants' nutrition[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press,

1991. 29–33.

[22] Schenk M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. Plant Soil, 1996, 181: 131–137.

[23] 童依平，李继云，李振生. 不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究 Ⅱ. 影响吸收效率的因素分析[J]. 西北植物学报，1999，19(3)：393–401.
Tong Y P, Li J Y, Li Z S. Genotypic variations of nitrogen use efficiency in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) Ⅱ. Factors affecting nitrogen uptake efficiency[J]. Acta Bot. Bor. – Occid. Sin., 1999, 19(3): 393–401.

[24] 吴旭银，张淑霞，吴贺平，等. 越冬菠菜鲜重、干重的增长动态[J]. 河北职业技术师范学院学报，2003，17(1)：9–11，15.
Wu X Y, Zhang S X, Wu H P *et al*. The increasing trends of fresh and dry weight of overwintering spinach[J]. J. Hebei Voc. – Tech. Teach. Coll., 2003, 17(1): 9–11, 15.

[25] 山东省农业科学院. 山东蔬菜[M]. 上海：上海科学技术出版社，2000. 238–240.
Shandong AAS. Shandong vegetable[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000. 238–240.

[26] 陈雨海，余松烈，于振文. 小麦间作菠菜的边际效应与基施氮肥利用率[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10 (1)：29–33.
Chen Y H, Yu S L, Yu Z W. The border effect and utilization rate of N fertilizer as base under wheat intercropped with spinach [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10 (1): 29–33.

[27] 王瑜，范双喜. 绿叶蔬菜优质高产栽培[M]. 北京：中国农业大学出版社，1998.
Wang Y, Fan S X. High yield and good quality cultivation in green vegetables[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1998.

[28] Kristensen T K. Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot [J]. Acta Hort., 2001, 563: 201–206.

[29] 李家康，陈培森，沈桂琴，等. 几种蔬菜的养分需求与钾素增产效果[J]. 土壤肥料，1997，(3)：3–6.
Li J K, Chen P S, Shen G Q *et al*. The reqirement to nutrition and the effects of increasing production of K fertilizer for vegetables [J]. Soil Fert., 1997, (3): 3–6.

[30] 汤丽玲，陈清，张宏彦，等. 不同灌溉与施氮措施对露地菜田土壤无机氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2002，8(3)：282–287.
Tang L L, Chen Q, Zhang H Y *et al*. Effects of different irrigation and fertilization strategies on soil inorganic N residues in open field of vegetable rotation system [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(3): 282–287.

[31] 王朝辉，田霄鸿，李生秀，等. 蔬菜与小麦硝态氮累积的差异[J]. 干旱地区农业研究，1998，16(3)：25–30.
Wang Z H, Tian X H, Li S X *et al*. Differences between vegetable and wheat in nitrate accumulation [J]. Agric. Res. Arid Areas., 1998, 16(3): 25–30.

[32] 王朝辉，宗志强，李生秀，等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学，2002，23(3)：80–83.
Wang Z H, Zong Z Q, Li S X *et al*. Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields [J]. Environ. Sci., 2002, 23(3): 80–83.

[33] Grindlay D J C. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area [J]. Agric. Sci., 1997, 128: 377–396.

[34] Foulkes J M, Bradley R S, Scott R K. Evidence for differences between wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen[J]. J. Agric. Sci., 1998, 130: 29–44.

[35] 周顺利，张福锁，王兴仁. 冬小麦不同氮营养品种对氮反应吸收与土壤硝酸盐耗竭的研究[J]. 中国农业科学，2002，35(6)：667–672.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Study on differences in nitrogen nutrition between winter wheat varieties in response, uptake to nitrogen and associated depletion of soil nitrate [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(6): 667–672.

[36] 童依平，李继云，刘全友，等. 收获后不同小麦品种土壤硝态氮残留量的差异研究[J]. 环境科学学报，2000，20(2)：251–253.
Tong Y P, Li J Y, Liu Q Y *et al*. A study on soil nitrate residue after the harvest of various wheat varieties [J]. Acta Sci. Circumst., 2000, 20(2): 251–253.

[37] 张丽娟，巨晓棠，高强，等. 小麦各生育期对土壤不同深度标记硝态氮的利用[J]. 中国农业科学，2005，38(11)：2261–2267.
Zhang L J, Ju X T, Gao Q *et al*. Recovery of labeled nitrate-N in different soil layers by wheat in different growth stages [J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(11): 2261–2267.