植物营养与肥料学报 2010,16(2):312-320
Plant Nutrition and Fertilizer Science

夏季休闲与种植对华北潮土剖面残留硝态氮分布的影响

张丽娟[1,2], 巨晓棠[1*], 吉艳芝[2], 张福锁[1], 彭正萍[2]
(1 教育部植物-土壤相互作用重点实验室,农业部植物营养学重点实验室,
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,保定 071001)

摘要: 本研究以高丹草(*Pacesetter*)结合单作春玉米(*Zea mays* L.)及休闲,探讨华北潮土区夏季多雨时期,牧草、作物及休闲三种土地管理方式土壤剖面 0—200 cm NO_3^--N 的分布及运移。研究表明,整个生长季节三种土地管理方式土壤 NO_3^--N 逐渐向下层移动,高丹草、玉米地均表现为 NO_3^--N 的逐渐耗竭,休闲地则为波浪式上升; 种植结束时休闲地在 0—200 cm 土壤层次硝态氮较种植前增加,高丹草、玉米地则表现为较种植前降低,NO_3^--N 在剖面 60—80 cm 深度出现积累。与休闲相比,植物对土壤剖面硝态氮的吸收显著减少了硝态氮向深层的淋溶,而休闲却增加了硝态氮向深层淋溶的风险。根长密度及根干重均随剖面深度增加而降低,在 0—30 cm 土层高丹草明显大于玉米,0—60 cm 区域植物根长密度与相应层次土壤 NO_3^--N 消减量呈现显著正相关。高丹草对土壤上层氮素的吸收消耗大于玉米,其对截获残留硝态氮,阻止硝态氮大量向下迁移的作用更强,体现出植物吸收的"安全网"功能。

关键词: 休闲; 玉米; 高丹草; 硝态氮
中图分类号: S344; S153.6+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)02-0312-09

Effects of fallow and plant growth in summer on the movement of residual nitrate in aquic soil on North China Plain

ZHANG Li-juan[1,2], JU Xiao-tang[1*], JI Yan-zhi[2], ZHANG Fu-suo[1], PENG Zheng-ping[2]
(*1 Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education/Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture/ College of Agricultural Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;*
2 College of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: This study was to investigate nitrate distribution and movement in 0-200 cm soil layers among three land management systems in summer, such as Sorghum hybrid Sudangrass(*Pacesette*), spring maize and fallow in North China Plain. The results showed that soil nitrate in all treatments gradually leached downword during the whole plant growth season, and in the systems of Sorghum hybrid Sudangrass and spring maize it gradually declined, but in summer fallow system it increased with a wave-manner. After harvest, compared with pre-plant, nitrate in 0-200 cm soil layers with the treatment of summer fallow enhanced, but of Sorghum hybrid Sudangrass and spring maize it decreased, then accumuled into 60-80 cm soil depth. By contrast with fallow, plant absorption of soil nitrate could significantly reduced the leaching downword, while summer fallow was on the contrary. Root length density and dry weight decreased with the soil depth and the root length density of Sorghum hybrid Sudangrass at soil depth of 0-30 cm was significant higher than that of maize. There was a significant positive relation between plant root length density and soil nitrate decrease in 0-60 cm soil layer. Nitrogen absorption in the topsoil of Sorghum hybrid Sudangrass was more than that of maize. This showed that the former had larger capacity to intercept residual nitrate and hold its leaching. It also presented that plant had the function of 'safety net'.

收稿日期: 2009-04-22　　**接受日期**: 2009-11-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(30940048, 30571110); 科技部"863"项目(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。
Tel: 0312-7528210, E-mail: lj-zh2001@163.com。　* 通讯作者 Tel: 010-62733459, E-mail: juxt@cau.edu.cn

Key words: fallows; maize; sorghum hybrid sudangrass; nitrate; movement

北方旱地长期大量施用氮肥,在显著提高作物产量的同时,也造成土壤剖面中硝态氮严重积累[1-2],成为威胁生态环境的"化学定时炸弹"[3]。周顺利等[4]研究发现,一季冬小麦收获后 0—100 cm 土层盈余氮高达 199.8 kg/hm^2,盈余氮的主体是 NO_3^--N。北京市不同种植体系农田中,即使土壤 NO_3^--N 累积最低的粮田,冬小麦-夏玉米轮作地块平均累积量达 459 kg/hm^2[5]。根据调查,河北省定州市蔬菜种植基地大棚土壤 0—120 cm 硝态氮累积量明显高于农田,相当于农田的 8.5 倍[6]。华北平原属暖温带半湿润大陆季风气候区,60%~70%的降水集中在 7~9 月份,夏季持续的降水使 NO_3^--N 继续向土壤深层移动,累积的硝态氮如不及时被作物吸收利用,在比较湿润的气候和大量灌溉条件下,就将发生向下移动,逐渐移出作物根区(1 m),使生物有效性降低,而且造成土壤深层 NO_3^--N 累积量增加或直接进入浅层地下水[7-8]。因此,研究探讨如何降低土壤氮素残留及实现土壤中过量氮素的再利用,减少硝酸盐淋洗损失具有重要的理论与现实意义。

累积的硝态氮一般会在土壤剖面不同层次滞留很长时间[9],除非遇到一次性强降雨(或强灌溉)会向下移动或进入浅层地下水[10],这就为选择适宜植物充分利用土壤深层累积硝态氮提供了时间上的可能性。Noordwijk 等和 Rowe 等[11-12]认为,植物可以通过其根系网络拦截来自剖面浅层的营养,深根植物则可通过根系的下扎将下层累积的养分"泵吸"提取上来。选择适宜的植物种类,通过合理轮作及间作等种植方式,"截获"和"泵吸"土壤剖面中潜在氮源,减少硝态氮的淋洗及根区下的深层累积已引起广泛的注意[13-14]。Gustafson 等[15]认为,主作物生长季之后种植一季填闲作物可有效吸收土壤剖面累积的硝态氮,使 NO_3^- 淋溶损失降低 75%。在浅根作物种植之前先种植深根作物,可以将深层的非有机氮提升到作物根系的土层深度处,降低氮素渗漏提高氮利用效率[16]。大豆和田菁与禾本科作物轮作能够消除硝态氮在深层土壤的积累,田菁休闲或生草休闲均比单作玉米能更有效地利用土壤残留氮素[17]。Whitmore 等[18]研究表明,在玉米的行间套种牧草可将土壤中渗出液的氮浓度降低至 15 mg/L;彭琳等[19]研究表明,种植具有须根系的谷类作物,不会造成氮素淋失,直根作物则可能引起氮素淋失,过长时间的裸地休闲一定会导致氮素的淋失。

高丹草是饲用高粱和苏丹草自然杂交的一年生禾本科牧草,喜温喜肥水,根系发达吸收能力极强[20]。本研究以其作为禾本科牧草的代表,结合单作春玉米及裸地休闲,探讨华北潮土区夏季多雨时期作物、牧草及休闲三种土地管理方式高残留硝态氮土壤剖面 0—200 cm NO_3^--N 的运移,裸地休闲用来评价没有作物生长情况下 NO_3^--N 的状况,从而分析累积硝态氮的淋溶风险,并探索土壤残留氮的植物修复途径,为残留氮的植物有效利用及降低对地下水污染的风险提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

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(北纬 39°56',东经 116°20')。属于典型的半干旱季风气候区。地下水埋深 15 m,降水主要分布在 6~8 月。多年平均降水量为 618 mm,且年际间变化大。试验期间 5~9 月降水量(图 1)346 mm,是 1952~1996 年该期间平均降水量的 62%,属干旱年份。

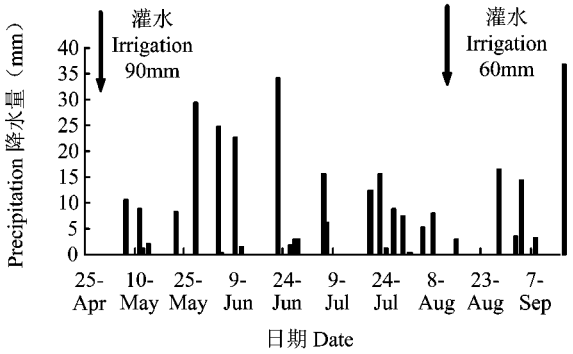

图 1　作物生育期间降水量与灌水量

Fig.1　Precipitation and irrigation during the crop growth season

试验地土壤为山前平原冲积性潮土。各土层基础理化性状见表 1。按北京地区肥力分级标准[21],该试验地属高肥力土壤。但由于试验地在匀地的前 2 季作物未施氮肥,土壤铵态氮、硝态氮含量较低。

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)	机械组成(%) Mechanical composition Sand/Silt/Clay
0—20	7.87	21.3	1.19	3.3	6.6	43.3	155.3	1.34	27/57/16
20—40	7.93	21.2	0.94	2.6	7.9	30.5	119.8	1.44	25/58/17
40—60	7.99	10.5	0.61	3.0	2.7	3.3	80.4	1.52	22/60/18
60—80	7.98	7.53	0.59	3.0	4.5	1.0	80.4	1.49	31/55/14
80—100	7.98	6.45	0.45	2.4	4.1	0.6	68.5	1.54	25/59/16

1.2 试验设计

1.2.1 土壤硝态氮高残留剖面设置 试验前一年先进行匀地种植夏玉米,上茬收获后冬季休闲,3月15日按试验要求划定18个试验小区,小区面积15 m^2,预设土壤硝态氮高残留剖面。3月30日施用尿素(含氮量46%)870 kg/hm^2,相当于N 400 kg/hm^2,同时灌水150 mm;4月15日施用尿素(含氮量46%)435 kg/hm^2,相当于N 200 kg/hm^2,同时灌水150 mm。

按小区面积计算实际施氮量和灌水量,每个划定试验小区的施氮量和灌水量完全一致。

1.2.2 试验设计 在预设的硝态氮高残留剖面上,设置田间种植与休闲试验。试验因素为氮肥与土地管理方式,试验设:1)施氮种植高丹草,施氮肥N 150 kg/hm^2(简称GN150);2)施氮种植玉米,施氮肥N 150 kg/hm^2(简称YN150);3)施氮休闲并控制杂草,施用氮肥N 150 kg/hm^2(简称XN150);4)不施氮种植高丹草(简称GN0);5)不施氮种植玉米(简称YN0);6)不施氮休闲并控制杂草(简称)XN06个处理,每个处理重复3次,随机区组排列。

氮肥(尿素,含N 46%),过磷酸钙(含P_2O_5为17%)和氯化钾(含K_2O为60%)按当地常规施用量的低限施用,分别为60 kg/hm^2,将肥料按原划定的小区要求称好后与0—20 cm耕层土壤充分混合。8月6日灌水一次,灌水量为60 mm。

供试玉米品种为农大108,条播行距60 cm,株距30 cm,每公顷55000株,5月2日播种,9月14日收获;供试高丹草品种为标兵(Pace maker),条播行距40 cm,播种量37.5 kg/hm^2,5月2日播种,分别在6月29日、8月17日刈割一次,9月14日与玉米同时收获。裸地休闲在5月16日、5月24日、6月17日、7月2日、8月4日、8月31日6次不定期清除田间杂草。

1.3 样品采集及测定

设置土壤硝态氮高残留剖面之前,用土钻随机采集0—200 cm(以20 cm为间隔)的土壤样品,分析土壤NH_4^+-N、NO_3^--N含量。剖面预设处理完成后试验作物种植前,每一区组设3点采集0—200 cm土壤样品,测定基础理化性质(0—100 cm)及土壤NH_4^+-N、NO_3^--N含量。在作物生长期间每15 d采集0—200 cm(以20 cm一层)的土壤样品1次,每小区采2钻,同层混合。所采集样品全部用于测定土壤NH_4^+-N、NO_3^--N及土壤水分测定。

收获时在与土钻取样相应的位置,用直径8 cm的根钻按15 cm为间隔,采集0—150 cm的根系样品,每小区4钻。

春玉米收获时先将每小区边行、两头的两行剔除,再剔除不均匀个别株后作为一个大样本(约34—38株),称取秸秆、穗重,并从中均匀选取10株称量秸秆、穗重,然后将秸秆全部切碎混合均匀取得分析样,与穗一起风干一段时间,最后70℃下烘干。烘干后分子粒、秸秆称重。

高丹草于6月29日、8月17日刈割时,先在小区内划定1 m^2,留茬高度20 cm收割称鲜重后70℃下烘干,烘干后测其干重,同时在划定1 m^2小区内选一定面积齐地面割取预留的根茬,称鲜重,并烘干称干重,用于计算刈割留取根茬对产量的贡献;小区剩余部分留茬20 cm后全部收割称取鲜重。9月14日收获时仍然先划定1 m^2小区,齐地面收割称鲜重后70℃下烘干,烘干称干重,然后把小区剩余部分齐地面全部收割称取鲜重。

NH_4^+-N,NO_3^--N的测定:采集的新鲜土样过5 mm筛后,称取12.00 g的土样于180 mL的塑料瓶中,加入100 mL浓度为0.01 mol/L的氯化钙溶液,振荡1 h后过滤,滤液冷冻保存。测定前将滤液解冻,稀释后采用连续流动分析仪法(TRAACS-2000)

测定滤液中 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量。

土壤和植株全氮按开氏法测定。

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,采用交叉网格法测定样品的总根长[22],计算根长密度,同时测定根干重。

试验数据采用 SAS 软件(6.12 版)中的 ANOVA 程序(LSD 检验)和 Excel 中的 T 检验进行统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 作物地上部生物量、含氮量和氮累积量

两种作物地上部植株生物量具有显著的差异(表 2),在 N150、N0 2 个处理中,高丹草地上部植株生物量均低于玉米,达到极显著的水平。与玉米相比,高丹草明显大于玉米秸秆含氮量,与玉米子粒相当,但又显著高于玉米植株平均含氮量。这导致了两种作物在氮累积量上的差异。从数值上看,高丹草均大于玉米,但 N0 处理没有表现出统计上的差异,N150 处理则具有显著性差异。

表 2　作物地上部生物量、含氮量和氮累积量

Table 2　Biomass, N content and accumulation of shoot

作物 Crop	项目 Item	N150 生物量 Biomass (kg/hm^2)	N150 含氮量 N content (%)	N150 氮累积量 N accumulation (kg/hm^2)	N0 生物量 Biomass (kg/hm^2)	N0 含氮量 N content (%)	N0 氮累积量 N accumulation (kg/hm^2)
高丹草 Sorghum hybrid sudangrass	合计 Total	14942	1.2	181.1	14895	1.1	169.0
玉米 Maize	秸秆 Straw	11300	0.5	59.0	10758	0.5	55.3
	子粒 Grain	7346	1.4	103.5	7310	1.4	102.7
	合计 Total	18645		162.5	18068		158.0
T 检验 T-test		**	*	*	**	*	

注(Note):*、** 分别表示 2 个作物同一项目显著性水平达 $P<0.05$、$P<0.01$(T-test) Stand for the same item between two crops is the significant level $P<0.05$、$P<0.01$, respectively.

2.2 夏季不同土地管理方式对收获后土壤剖面硝态氮分布的影响

与种植前相比,三种土地管理方式土壤剖面 0—80 cm NO_3^--N 变化明显(图 2)。表现出休闲地最高,高丹草最低,而玉米居中的趋势。在剖面 60—80 cm 处出现累积峰,N150 处理高丹草、玉米、休闲地累积峰值分别为 35.6、50.4、67.1 mg/kg; N0 处理分别为 34.3、55.4、67.8 mg/kg。说明在该季节的降雨和灌溉作用下,硝态氮迁移到土层 60—80 cm。100 cm 以下土层三种土地管理方式差异不明显。

一季作物种植后一定深度土体氮素的平衡(盈亏):土壤氮素平衡 = 0—100 cm(或 0—200 cm)土体残留氮素 + 湿(或干湿)沉降带入氮 + 灌溉水带入氮 - 作物吸收土壤氮。如果平衡是正值则表示土壤氮素盈余,如果为负值,则表示亏缺。

三种土地管理方式的土壤剖面氮素平衡分析(表 3)看出,在硝态氮高累积剖面一季种植后土壤氮素总平衡仍表现为盈余,0—100 cm 土层呈现出裸地休闲 > 玉米 > 高丹草的趋势,施氮与否没有影响;0—200 cm 则裸地休闲明显高于玉米和高丹草,后两者之间未表现出差异。夏季种植结束后,裸地休闲在 0—100 cm 土壤层次较种植前增加,种植高丹草、玉米则较种植前减少,高丹草的减少趋势强于玉米。100—200 cm N150 高丹草、玉米与播前相比仍表现为耗竭,分别减少 33.4 和 40.4 kg/hm^2; N0 处理高丹草、玉米减少 8.4 和 44.4 kg/hm^2。

2.3 两种作物根系与硝态氮剖面分布的关系

作物收获后土壤剖面中根系分布如图 3。可以看出,根长密度及根干重均随剖面深度增加而降低,在 0—30 cm 土壤层次高丹草的根长密度明显大于玉米,与施用氮肥关系不大;30—60 cm 区域虽然高丹草高于玉米,但差异不显著;60 cm 以下层次两种作物则无明显差异。但是 0—60 cm 区域的作物的根长密度与收获后相应区域土壤剖面硝态氮的消减量达到极显著相关($r=0.7030$**,$P<0.01$,图 4)。在 N150 处理中根干重与根长密度表现出相似的趋势,0—30 cm 土壤层次高丹草明显大于玉米;N0 处理 0—30 cm 高丹草根干重虽大于玉米,但差异不显著。

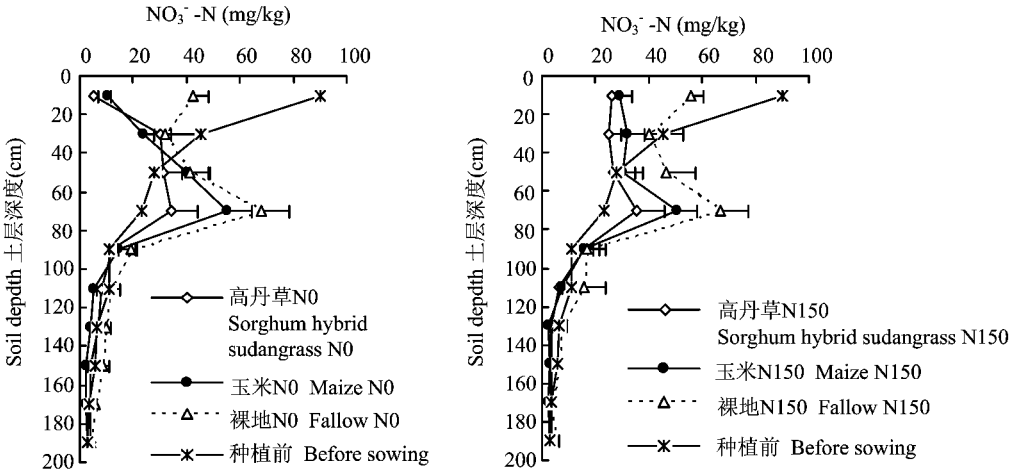

图2 夏季休闲与种植对收获后土壤剖面硝态氮分布的影响

Fig.2 Effect of fallow or plant in summer on the distribution of NO_3^--N in soil profile after harvest

表3 三种夏季土地管理方式土壤氮素的总平衡（N kg/hm²）

Table 3 Total balance of nitrogen in three land use management in summer

土层 Soil layer (cm)	处理 Treat.	土壤硝态氮 NO_3^--N in soil 播前 Pre plant	总残留 Total residual	氮输入（湿沉降+灌溉水） N input (Wet sediment + Irrigation)	作物总吸氮量 Total crop absorption	总的氮平衡 Total N balance	收获后—播前 NO_3^--N Harvest-Pre plant
100	GN0	555.95	329.05	25.8	169	185.85 c	-226.89
	YN0	555.95	421.13	25.8	158	288.93 b	-134.82
	XN0	555.95	584.12	25.8	0	609.92 a	28.17
	GN150	555.95	373.05	25.8	181.1	217.75 c	-182.89
	YN150	555.95	452.11	25.8	162.5	315.41 b	-103.84
	XN150	555.95	651.61	25.8	0	677.41 a	95.67
200	GN0	654.62	419.33	25.8	169	276.13 b	-235.29
	YN0	654.62	475.45	25.8	158	343.25 b	-179.17
	XN0	654.62	714.67	25.8	0	740.47 a	60.06
	GN150	654.62	438.34	25.8	181.1	283.04 b	-216.27
	YN150	654.62	510.39	25.8	162.5	373.69 b	-144.22
	XN150	654.62	777.17	25.8	0	802.97 a	122.55

注(Note)：每行数值后不同字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平(LSD) Values followed by different letter in same horizontal shows 0.05 level significant different among treatments.

2.4 土壤剖面硝态氮的动态变化

三种土地管理方式土壤 NO_3^--N 的动态变化(图5)看出，种植前土壤剖面0—120 cm的 NO_3^--N 含量较高，在5—9月的134 d时间内，土壤 NO_3^--N 发生了逐渐向下层移动的现象，种植结束时 NO_3^--N 在剖面60—80 cm深度出现积累；种植作物的两种处理均表现为 NO_3^--N 的逐渐耗竭，裸地休闲则为波浪式上升。

种植高丹草和玉米，苗期由于植株吸收土壤氮素较少，而5月28日(种植后27 d)、6月9日(种植后38 d)2次较大降水(22、23 mm)，使土壤上层 NO_3^--N 发生向下淋洗，但仅影响到40 cm层次。此后植物生长迅速土壤 NO_3^--N 耗竭明显，高丹草耕层不施氮对0—20 cm层次 NO_3^--N 的吸收较玉米强烈，而且一直持续到最后收获，但施氮处理中则无此现象，只是在第二次刈割之后对土壤上层0—40 cm-NO_3^--N 吸收明显，可见即使土壤剖面 NO_3^--N 含量很高，喜氮的禾本科牧草高丹草仍然表现对氮素的高需求[23]。高丹草对土壤上层氮素的吸收大于玉米，与其在相应土壤层次具有较高根长密度显著相关(图4)。

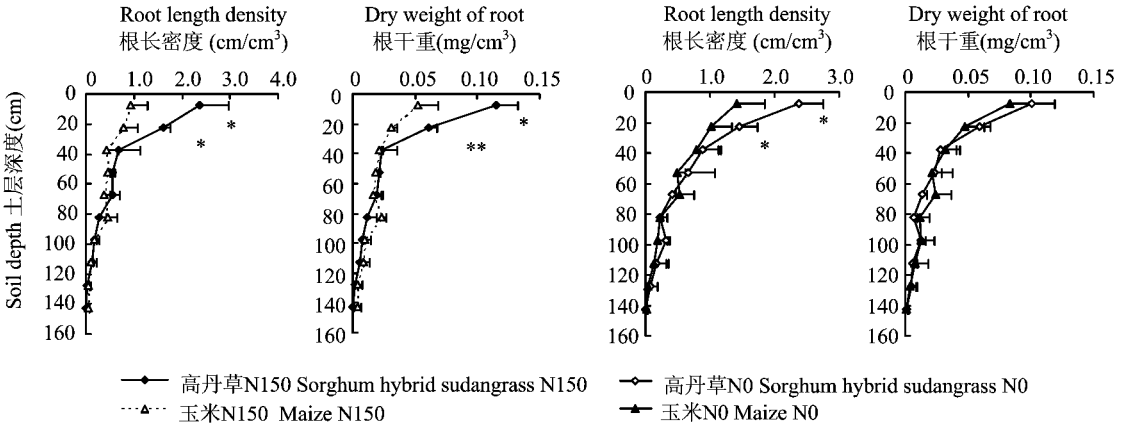

图 3　土壤剖面作物根长密度和根干重的变化

Fig.3　Root length density and dry weight in different soil depth

[注(Note): * 、* * 分别表示 2 个作物同一项目显著性水平达 $P<0.05$、$P<0.01$(T-test)

Stand for the same item between two crops is the significant level $P<0.05$, $P<0.01$, respectively.]

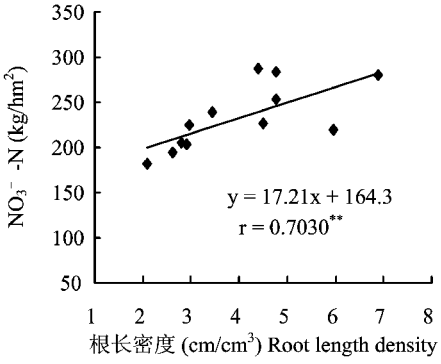

图 4　土壤硝态氮消减量与作物相应土层根长密度的相关性

Fig.4　The relationship between soil nitrate increase and root length density

裸地休闲由于土壤剖面不饱和水分运动强烈,土壤 NO_3^--N 向下层淋洗程度强于作物种植体系,尤其在 N150 处理表现更为明显,NO_3^--N 下移前锋到达 140 cm 处;土壤上层 NO_3^--N 呈现时降时升趋势,这可能是来自于表土的氨挥发、反硝化损失的负影响及土壤氮素矿化的正影响。

3　讨论

本试验通过禾本科牧草、春玉米单作及裸地休闲,分析华北潮土区夏季多雨时期,三种土地管理方式对高残留硝态氮土壤剖面 0—200 cm NO_3^--N 运移的影响,初步探索了 NO_3^--N 严重累积土壤的生物修复途径。玉米、高丹草虽同属禾本科作物,但二者的生物学特性有很大差异[24]。高丹草喜温喜肥水,根系发达吸收能力极强,属多次利用型,能耐受频繁的刈割,并能多次再生[20]。刈割次数对根系生物量和养分贮量影响显著[25],从而明显影响其生物学产量[26]。本试验高丹草地上部植株生物量低于玉米,但地上部吸氮量均大于玉米,在 0—30、30—60 cm 土壤层次高丹草的根长密度明显大于玉米,根密度与氮素的吸收存在线性关系[12, 27]。0—60 cm 区域植物根长密度与相应层次土壤 NO_3^--N 消减量呈现显著正相关,说明高丹草对土壤上层氮素的吸收消耗大于玉米。

N150 处理高丹草、玉米 0—100 cm 土壤剖面 NO_3^--N 与播前相比分别减少 182.9 和 103.8 kg/hm²; N0 处理分别减少 226.9 和 134.8 kg/hm²,高丹草较玉米减少趋势要大。由此推知,种植高丹草根区范围残留 NO_3^--N 低于种植玉米。高丹草比玉米在截获上层残留硝态氮,阻止其大量向下迁移的作用更大,体现出 Rowe 等[23]提出的植物吸收的“安全网”功能; Mekonnen 等也认为生草可以比玉米更有效地利用土壤 NO_3^--N[28]。

100—200 cm 土层 N150 高丹草、玉米与播前相比仍表现为耗竭,玉米较高丹草减少趋势要大。玉米对 100 cm 以下深层土壤 NO_3^--N 利用能力可能较强。我们采用将^{15}N 标记的硝态氮注射于土壤剖面 110 cm 处的田间微区试验法,研究玉米对深层标记 NO_3^--N 的利用试验表明[29],在土壤施氮和不施氮的条件下,玉米对注射于土壤剖面 110 cm 处^{15}N 标记的硝态氮的利用率分别为 11.9%和 6.7%,可见玉米或许具有通过根系的下扎将下层累积的养分“泵吸”的能力。

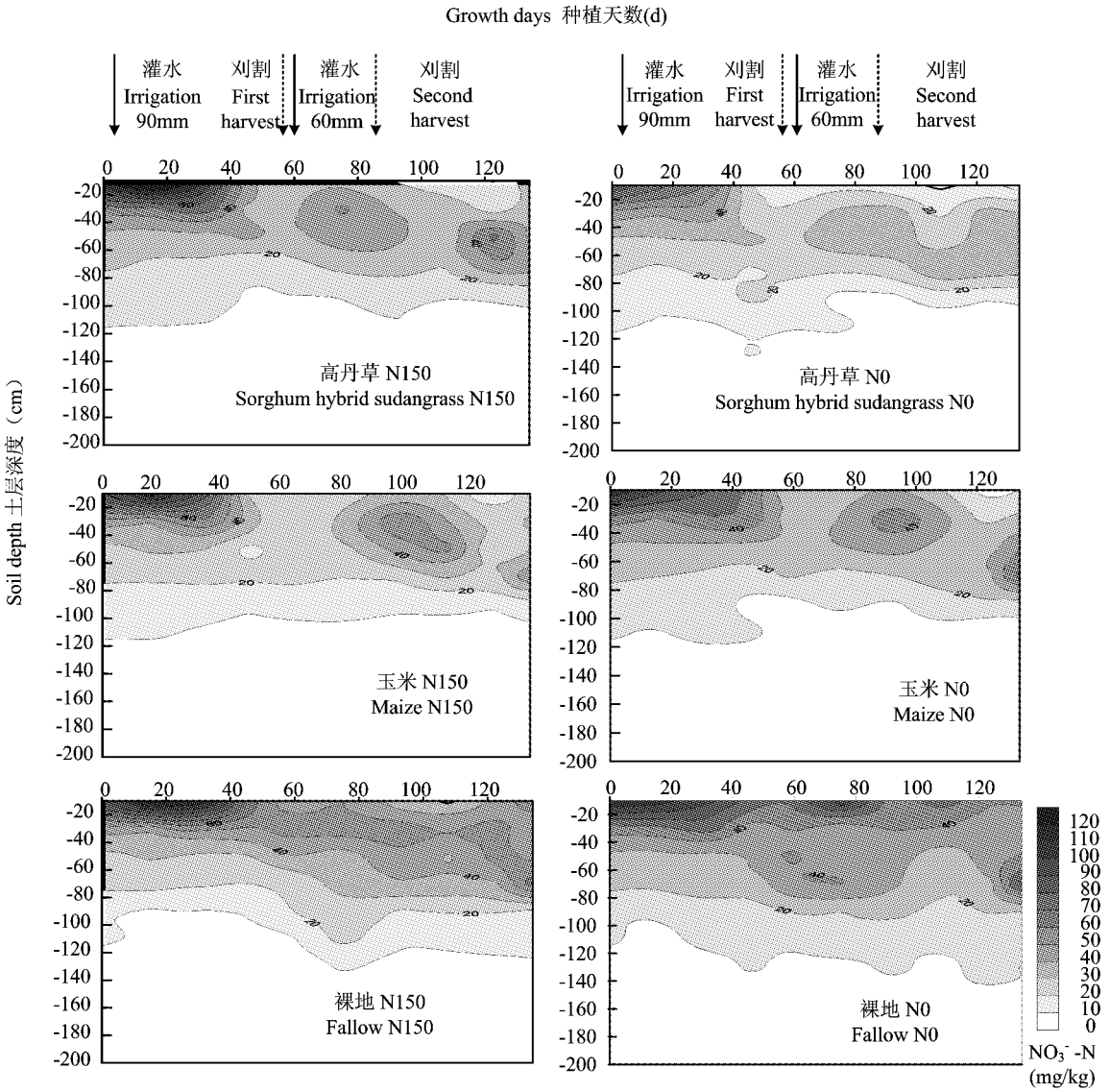

图5 三种土地管理方式土壤剖面硝态氮动态

Fig.5 Dynamics of NO_3^--N in 0－200 cm soil profile in three land use management

整个生长季节三种土地管理方式土壤 NO_3^--N 均发生了逐渐向下层移动的现象。种植结束时 NO_3^--N 在剖面 60—80 cm 深度出现积累，N150 处理高丹草、玉米、休闲地累积峰值分别为 35.6、50.4、67.1 mg/kg；N0 处理分别为 34.3、55.4、67.8 mg/kg。说明在该季节的降雨和水流作用下，硝态氮迁移到 60—80 cm 土层。据高强[30]分析，在中德合作项目试验基地与本试验相同性质的土壤上，1 mm 水量使土壤剖面表层累积硝态氮下移了 0.16 cm，在本试验期间表层高量累积的 NO_3^--N 的下移推测距离约在 79 cm。

高丹草、玉米在整个生长季节均表现为对土壤剖面 NO_3^--N 的逐渐耗竭；裸地休闲与种植前相比剖面 0—200 cm 的 NO_3^--N 累积增加，而且土壤 NO_3^--N 向下层淋洗程度强于作物种植体系。Martin[31]的研究也认为，由于土壤有机质的分解和矿化导致 NO_3^--N 浓度的增加，休耕地表层 30 cm 土壤 NO_3^--N 浓度在 6 年间增加了 3 倍，低于 60 cm 以下土层的 NO_3^--N 可能发生被土壤水流转移；李世清的研究表明，任何采样时期休闲小区土层 120 cm 深处 NO_3^--N 含量比种植玉米高，NO_3^--N 的淋失休闲比玉米高 1 倍[32]，裸地休闲一定会导致氮素的淋失[19]。

不同植物种类对土壤氮素的吸收潜力具有差异性。深根填闲植物吸氮效果明显，具有减少 NO_3^--N 淋溶的潜力[33]。因此，今后的研究应采取轮作、间

作合理搭配,浅根、深根植物的组合使 NO_3^--N 植物修复效果达到最优化[16],进一步剖析剖面积累的 NO_3^--N 的迁移变化机理与作物根系之间的关系以及对土壤性状和环境的影响,探索不同作物间的合理轮作与间作以及农林复合系统中土壤累积 NO_3^--N 的生物修复的可能性。

参 考 文 献:

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

[2] 赵俊晔,于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报,2006, 26(3): 815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.

[3] 龚子同,黄标. 关于土壤中"化学定时炸弹"及其触爆因素的探讨[J]. 地球科学进展,1998,13(2): 184-191.
Gong Z T, Huang B. Studies on potential "chemical time bombs" and their igniting factors in soil [J]. Adv. Earth Sci., 1998, 13(2): 184-191.

[4] 周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 Ⅰ. 冬小麦[J]. 生态学报,2001,21 (11): 1782-1789.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen Ⅰ. Winter wheat [J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 21(11): 1782-1789 .

[5] 刘宏斌,李志宏,张云贵.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. 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.

[6] 袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等.设施蔬菜土壤剖面氮、磷、钾剖面积累及对地下水的影响[J]. 中国农业生态学报,2010, 18(1): 1-7.
Yuan L J, Ju X T, Zhang L J *et al*. Effects of N, P, K accumulation in greenhouse soils profile on the ground water[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(1): 1-7.

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

[8] 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.

[9] Zhang L J, Ju X T, Gao Q *et al*. Recovery of ^{15}N-labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a Calcaric Cambisol in North China Plain[J]. Com. Soil Sci. Plant Anal., 2007, 38(1): 1563-1577.

[10] 赵露露. 高强度降雨及灌水对土壤累积硝态氮移动的影响[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文,2007.
Zhao L L. Movement of accumulative nitrate affected by strong rainfall and irrigation in summer[D]. Beijing: Ms thesis of China Agricultural University, 2007.

[11] Van Noordwijk M, Lawson G, Soumare A *et al*. Root distribution of trees and crops: Competition and/or complementarily[A]. Ong C K, Huxley P (eds). Tree-crop interactions[C]. UK Waallingford: CAB International, 1996. 319-364.

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

[13] Kristensen H L, Thorup-Kristensen K. Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 529-537.

[14] Christiansen J S, Thorup-Kristensen K, Kristensen H L. Root development of beetroot, sweet corn and celeriac, and soil N content after incorporation of green manure [J]. J. Horticul. Sci. Biotech., 2006, 81(5): 831-838.

[15] Gustafson A, Fleischer S, Joelsson A. A catchment-oriented and cost effective policy for water protection [J]. Ecol. Engin., 2000, 14 (4): 419-427.

[16] Thorup-Kristensen K. Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations[J]. Plant Soil, 2006, 288: 233-248.

[17] Hartemink A E, Buresh R J, Jama B *et al*. Soil nitrate and water dynamics in Sesbania fallows, weed fallows, and maize [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 568-574.

[18] Whitmore A P, Schroder J J. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: A modelling study [J]. Europ. J. Agron., 2007, 27: 81-88.

[19] 彭琳,王继增,余存祖. 土壤氮素吸收利用与淋溶流失[J]. 水土保持学报,1996,2(2): 9-13.
Peng L, Wang J Z, Yu C Z. Soil nitrogen uptake by crops nitrogen leaching and loss from the eroded dryland [J]. J. Soil Eros. Soil Water Conserv., 1996, 2(2): 9-13 .

[20] 詹秋文,林平,李军,等. 高粱-苏丹草杂交种研究与利用前景[J]. 草业学报,2001,10 (2): 56-61.
Yan Q W, Lin P, Li J *et al*. Research and prospect of hybrid between sorghum (Sorghum bicolor) and smut (Sorghum sudanense) [J]. Acta Pratacul Turae Sin., 2001, 10(2): 56-61.

[21] 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.

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

[23] Lee J K, Seo S. Effect of N fertilization levels on the regrowth, carbohydrte reserves and dry matter yield of sorghum-sudangrass hybrid and other forage crops[J]. Kor. J. Anim. Sci., 1998, 30(7): 441-445.

[24] 裴冬,张喜英,李坤. 华北平原作物棵间蒸发占蒸散比例及减少棵间蒸发的措施[J]. 中国农业气象,2000,21(4): 33-37.
Pei D, Zhang X Y, Li K. The proportion of the evaporation to evapo-

transpiration and the measures to reduce the evaporation in North China Plain[J]. China Agric. Weath., 2000, 21(4): 33-37.

[25] 黄得光,张德强,周国逸,等. 刈割频率对两种牧草越冬的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2000,(增刊): 52-58.
Hang D G, Zhang D Q, Zhou G Y *et al*. Effect of harvesting frequency on overwintering forage grasses[J]. J. Trop. Subtrop. Bot. (Suppl.), 2000, 52-58.

[26] 邢素芝,汪建飞,徐传富. 施肥对高粱杂交草生长及干物质积累的影响[J]. 安徽技术师范学院学报,2002,16(4): 31-33.
Xing S Z, Wang J F. Effects of fertilizer on the growth and dry weight of sorghum hybrid grass [J]. J. Anhui Tech. Teach. Coll., 2002, 16(4): 31-33.

[27] 张丽娟,巨晓棠,高强,等. 两种作物对土壤不同层次标记硝态氮利用的差异[J]. 中国农业科学,2005,38(2): 333-340.
Zhang L J, Ju X T, Gao Q *et al*. Recovery of labeled nitrate-N in different soil layers by two kind of crops[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(2): 333-340.

[28] Mekonnen K, Buresh R J, Jama B. Root and inorganic nitrogen distribution in sesbania fallow, natural fallow and maize field[J]. Plant Soil, 1997, 188: 319-327.

[29] 张丽娟,巨晓棠,高强,等. 玉米对土壤深层标记硝态氮的利用[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5): 455-461.
Zhang L J, Ju X T, Gao Q *et al*. Recovery of ^{15}N-labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a Calcaric Cambisol in North China Plain [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(5): 455-461.

[30] 高强. 土壤剖面不同位置累积硝态氮的作物有效性及去向[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文,2003.
Gao Q. Crop availability and fate of residual nitrate in different position of soil profile[D]. Beijing, PhD dissertation China Agricultural University, 2003.

[31] Martin H E, Bullied W J, David A *et al*.. Extraction of subsoil nitrogen by alfalfa, alfalfa-wheat, and perennial grass systems [J]. Agron. J., 2001, 93: 495-503.

[32] 李世清,李生秀. 关中灌区夏季休闲效果评价[J]. 中国生态农业学报,2000,8(2): 54-57.
Li S Q, Li S X. Effects of summer fallow in Guanzhong irrigation area [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2000, 8(2): 54-57.

[33] Thorup-Kristensen K, Jensen M J, Stoumann L. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones[J]. Adv. Agron., 2003, 79: 227-302.