

DOI: 10.5846/stxb201211221647

李云, 刘炜, 王朝辉, 高亚军. 不同作物对旱地农田残留硝态氮的利用差异. 生态学报, 2014, 34(13): 3788-3796.

Li Y, Liu W, Wang Z H, Gao Y J. A comparison of the use of residual soil nitrate by winter wheat and alfalfa in the drylands of China's Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3788-3796.

不同作物对旱地农田残留硝态氮的利用差异

李 云^{1,2}, 刘 炜³, 王朝辉¹, 高亚军^{1,4,*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130;

3. 陕西省宝鸡市农技推广服务中心, 宝鸡 721000; 4. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:在黄土高原南部塬土上,通过 2a 田间试验研究了小麦和苜蓿对土壤中不同累积量的残留硝态氮的利用差异。研究包括 0—3 m 土壤残留硝态氮累积量(设 N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 共 6 个水平,残留硝态氮量依次增加)和作物种类(冬小麦和苜蓿) 2 个因素,分别采用冬小麦-夏休闲-冬小麦和苜蓿连作种植方式。结果表明,不施用氮肥条件下,冬小麦-休闲-冬小麦轮作周期与苜蓿连作 2a 内,土壤残留硝态氮的消长有明显差异。在第 1 季小麦生长期,小麦的氮素携出量(63.9—130.3 kg/hm²)、氮素携出量占播前残留硝态氮量的比例(18%—27%)及氮素携出量占该生长季硝态氮减少量的比例(29%—62%)均显著高于同期的苜蓿处理。在第 2 个生长季内,苜蓿的氮素携出量是小麦当季氮素携出量的近 6 倍,但由于苜蓿固氮作用强烈,至第 2 个生长季结束后,0—3 m 土壤硝态氮量与苜蓿播前相比平均只减少了 72.4 kg/hm²,而麦田 0—3 m 土壤硝态氮量与小麦播前相比减少了 158.3 kg/hm²。在短期内如果通过种植作物消耗土壤剖面的残留硝态氮,冬小麦比苜蓿更有优势。第 1 季小麦氮素携出量与小麦播前 0—2 m($r=0.920^{**}$)和 0—3 m($r=0.857^{*}$)土层残留硝态氮量呈显著或极显著正相关,与 0—1 m 土层残留硝态氮量没有显著相关性;第 1 生长季苜蓿氮素携出量与播前 0—1 m 土壤硝态氮累积量呈显著正相关关系($r=0.846^{*}$),而与 0—2 m 和 0—3 m 土壤硝态氮累积量的相关性并不显著。小麦比苜蓿能利用更深土层中的硝态氮。随着播前 0—3 m 土壤残留硝态氮的增加,小麦和苜蓿地上部氮素携出量呈增加的趋势,硝态氮表观损失也显著增加。

关键词:残留硝态氮;冬小麦;苜蓿;旱地

A comparison of the use of residual soil nitrate by winter wheat and alfalfa in the drylands of China's Loess Plateau

LI Yun^{1,2}, LIU Wei³, WANG Zhaohui¹, GAO Yajun^{1,4,*}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

3 Baoji Agricultural Technology Extension Center, Baoji 721000, China

4 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

Abstract: The application of excessive amounts of nitrogen fertilizer in dryland habitats continues to result in an increase in the amount of residual nitrate found in dryland soil profiles in the southern Loess Plateau of north central China. Efforts to use this resource have attracted considerable attention. A two-year field experiment was conducted in the southern Loess Plateau to investigate and compare how residual soil nitrate is used in winter wheat and alfalfa fields. Crops of alfalfa and winter wheat were grown in fields with six levels of residual soil nitrate, measured as the accumulated nitrate at soil depths of 0—3 m, with continuous alfalfa and wheat-summer fallow-wheat systems. Both crops exhibited similar yet different changes in the levels of residual soil nitrate during the two year study without the application of additional nitrogen fertilizer.

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103005);国家小麦现代产业技术体系建设专项经费;农业科研杰出人才及其创新团队培养计划;教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-08-0465)

收稿日期:2012-11-22; **网络出版日期:**2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yajungao@nwsuaf.edu.cn

During the first wheat growing season, soil nitrate at a depth of 0—3 m decreased by 42%—66% in the wheat fields while it decreased by 41%—73% in the alfalfa fields, compared with N levels before sowing. N uptake ($63.9\text{—}130.3\text{ kg/hm}^2$), the proportion of N uptake from the total residual soil nitrate prior to crop sowing (18%—27%), and the proportion of N uptake from soil nitrate reduction (29%—62%) was much higher for winter wheat than for alfalfa. The apparent reduction of soil nitrate in the upper 0—3 m of soil in the wheat field ($62.1\text{—}317.1\text{ kg/hm}^2$) was lower than that in the alfalfa field ($95.0\text{—}614.1\text{ kg/hm}^2$). During the second wheat growing season, N uptake of alfalfa was 593.8 kg/hm^2 , six times higher than the N uptake of wheat. However, residual soil nitrate in the alfalfa treatments increased as a result of strong N fixation by alfalfa. Compared with the N levels prior to crop sowing, the residual soil nitrate in the alfalfa field declined by 72.4 kg/hm^2 while it declined by 158.3 kg/hm^2 in the wheat field after two growing seasons. These results indicate that winter wheat used more residual soil nitrate than alfalfa during the two year study. If the goal is to reduce residual soil nitrate levels, winter wheat has the advantage of reducing nitrate levels faster than does alfalfa in a short period of time.

During the first wheat growth season, N uptake by wheat had a significant positive correlation to the levels of residual soil nitrate at a depth of 0—2 m ($r=0.920^{**}$) and 0—3 m ($r=0.857^*$) while it had no significant correlation to residual soil nitrate at depths of 0—1 m. On the contrary, N uptake by alfalfa had a significant positive correlation to residual soil nitrate at a depth of 0—1 m ($r=0.846^*$) prior to alfalfa sowing while it was not significantly correlated to residual soil nitrate at depths of 0—2 m and 0—3 m. These results indicate that residual nitrate in deeper soil contributed more to winter wheat N uptake when compared to N uptake by alfalfa.

The uptake of N by both wheat and alfalfa was significantly positively correlated to the levels of residual nitrate in the soil at depths of 0—3 m prior to the first season of wheat sowing. However, with higher initial soil nitrate levels, the apparent loss of N also increased. These results suggest that with increased levels of residual nitrate in the soil, crops were able to increase their uptake of soil N, resulting in the removal of higher amounts of N by the crops while higher amounts of N are lost from soil profile.

Key Words: residual soil nitrate; winter wheat; alfalfa; dryland

随着施氮量的迅速增加,作物收获后残留在土壤剖面的矿质氮量越来越高,其中旱地条件下以硝态氮为主^[1-2]。冬小麦收获后土壤中的残留硝态氮在降雨集中的夏季休闲期间很容易向下迁移^[3-5],具有淋溶(脱离根区)和反硝化损失的风险^[6]。然而,土壤剖面残留的硝态氮,也是作物的有效氮源,如果能够合理地利用,不仅提高氮素的利用效率,而且从根本上减少了硝态氮的淋失。

不同种类作物根系生长特点不同,因此对土壤残留氮素的利用具有显著差异^[7-8]。我国苜蓿种植面积约 133 万 hm^2 。黄土高原是我国苜蓿的传统种植区,栽培面积约占全国栽培总面积的 77 %^[9]。而冬小麦-夏休闲是黄土高原雨养农业区的主要种植制度之一。多年生苜蓿根系可深达 6 m ^[10],小麦根系主要集中在 0—0.3 m 土层,占总根量的 60%, 0.3—0.8 m 土层中只占 30%左右,0.8 m 以下数量锐

减^[11]。这两种作物对土壤残留硝态氮的利用有何不同呢? 利用 ^{15}N 标记肥料所做的研究发现,不同作物对土壤剖面硝态氮的利用率有显著差异^[12-13]。有报道指出,在干旱的黄土塬区小麦根系可以深扎到 400 cm 以下土层^[11],可以利用土壤深层 200—300 cm 积累的硝态氮^[14]。紫花苜蓿根系的分布深度在生长的 6a 以前,每年平均以 112.5 cm 的速度下伸,6 年生紫花苜蓿的根系分布深度可达 675 cm 以上^[10]。那么,这是不是意味着苜蓿可能比冬小麦能更好地利用土壤中的残留硝态氮呢? 本研究利用田间试验对此做深入探讨,着重考察累积在土壤剖面的硝态氮在苜蓿和冬小麦生长条件下的消长规律及其与作物氮素吸收的关系,为旱地氮素养分的管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

杨凌地处关中中部,属于黄土高原南部旱作区,

年均降水量 649 mm, 分布不均, 主要集中在 7、8、9 3 个月, 冬春易旱, 年均气温 12.9℃, 年蒸发量 1400 mm, 属半湿润易旱地区。

1.2 供试土壤和作物

试验于西北农林科技大学灌溉试验站进行, 供试土壤为娄土 (Lou soil), 0—20 cm 土层容重 1.31 g/cm³, pH 值 8.25, 有机质含量 9.63 g/kg, 全氮 1.07 g/kg, 速效钾 182.4 mg/kg, 速效磷 12.2 mg/kg。供试作物为冬小麦 (小偃 22)、苜蓿。

1.3 试验方案

研究包括 0—3 m 土壤残留硝态氮累积量和作物种类两个因素。残留硝态氮累积量设 N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 共 6 个水平 (0—3 m 土壤残留硝态氮累积量依次增加, 如图 1)。2003 年夏季休闲期间通过在不同时间施用氮肥和灌水造成不同残留氮累积量, 作物种类设冬小麦和苜蓿 2 个水平, 分别采用冬小麦-夏休闲-冬小麦和苜蓿连作种植方式。完全组合, 共 12 个处理, 重复 3 次。田间随机排列, 小区面积为 3 m×3 m=9 m², 小区之间间隔 1 m。

2003 年 10 月 22 日播种小麦和苜蓿, 不施氮肥, 底施磷肥 100 kgP₂O₅/hm²。在播种 (10 月 22 日)

前、小麦收获 (5 月 30 日) 后, 于小麦、苜蓿行间用土钻采土样, 每 20 cm 为 1 层, 采至 300 cm, 每小区取 2 个样点, 同一层 2 点的土壤混合, 作为该区该层次的样品, 测定其硝态氮含量。小麦收获后, 分茎叶、籽粒和颖壳 3 部分采植株分析样, 同时采苜蓿全株分析样和估产样品; 2004 年 10 月 20 日刈割全区苜蓿, 记产并取分析样, 同时采取土壤样品并测定土壤硝态氮含量。

第 2 季小麦于 2004 年 10 月 18 日播种, 不施氮肥, 底施磷肥 100 kgP₂O₅/hm², 2005 年 6 月 2 日收获小麦; 苜蓿第 2 个生长季开始前不施任何肥料, 分别于 2005 年 6 月 13 日、7 月 19 日和 9 月 23 日分 3 次刈割苜蓿并计产。在小麦播种 (10 月 18 日) 前、小麦收获 (6 月 2 日) 后、苜蓿第一次刈割 (6 月 13 日) 后, 于小麦、苜蓿行间采土样, 采样深度与方法均与 2003 年相同。2005 年小麦和苜蓿的植株样采集方法也与 2004 年相同。

该地区多年平均降雨量为 649 mm, 冬小麦生长期 (10 月—翌年 5 月) 平均降雨量约为 195 mm, 夏休闲期间降雨量约为 454 mm。2003 年 10 月 22 日—2004 年 5 月 30 日期间的降雨量为 117 mm, 2004 年 6 月 1 日—10 月 18 日的降雨量为 410 mm, 2004 年 10 月 19 日—2005 年 6 月 2 日的降雨量为 155 mm。作物生长期间没有补充灌水。

1.4 测定项目和方法

土壤 NO₃-N 含量用 1 mol/L 的 KCl 浸提 (土液比 1:10, 振荡 1 h), 连续流动分析仪测定。植株样品测定全氮含量 (凯氏法)。土壤硝态氮表观损失量根据文献依公式计算^[15]: 土壤硝态氮表观盈亏量 = 土壤硝态氮起始总量 - 土壤硝态氮残留总量 - 作物吸氮量。用 SAS 软件对数据做统计分析。

2 结果与分析

2.1 作物生长过程中土壤硝态氮累积量的变化

2.1.1 小麦生长期间土壤硝态氮的消长

第 1 个生长季 (2003 年 10 月—2004 年 6 月) 后, 麦田土壤剖面硝态氮累积量显著减小 (平均 241.6 kg/hm²), 减少量占播前 3 m 土层硝态氮累积量的 42%—66% (平均 49%)。随着播前土壤残留硝态氮的增加, 小麦生长期间 0—3 m 土层硝态氮的减少量及其占播前硝态氮累积量的比例均呈增加趋

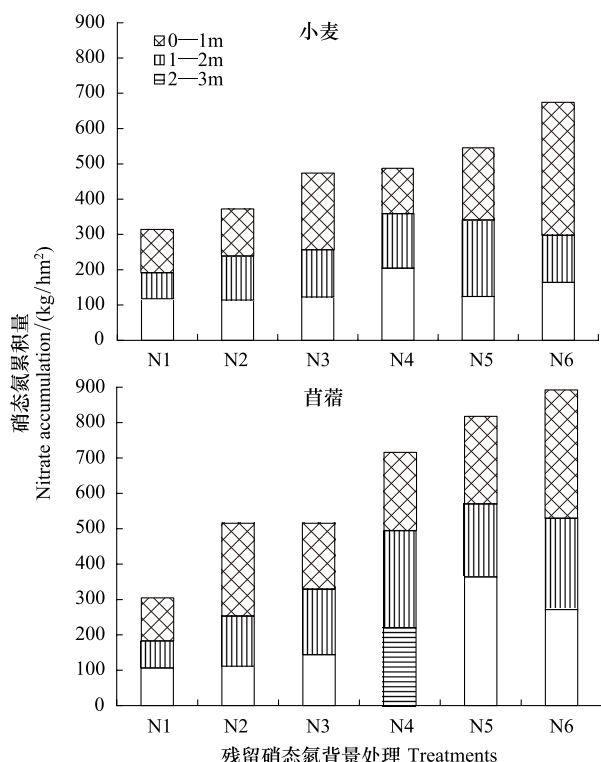


图 1 小麦田和苜蓿田土壤硝态氮残留背景

Fig.1 Accumulation of residual nitrate in 0—3 m soil depth before the test

势。其中 N6 处理的硝态氮减少量及其占播前硝态氮累积量的比例显著高于 N1—N5 处理 ($P=5\%$), N4 和 N5 处理的硝态氮减少量显著高于 N1 和 N2 处理 ($P=5\%$), N4 和 N5 之间、N1、N2 和 N3 之间的硝态氮减少量差异均不显著(表 1)。

在夏季休闲期间,土壤有机氮大量矿化,硝态氮量显著增加,但不同残留背景处理硝态氮增加量差异不大;硝态氮增加量显著高于小麦生长期间的减少量,平均为硝态氮减少量的 1.5 倍(表 1)。

至第 2 个生长季开始时,土壤硝态氮累积量已经恢复到比第 1 季小麦播前更高的水平:0—3 m 土层硝态氮平均为 547.5 kg/hm^2 ,比第 1 季播前土壤平均高出 69.9 kg/hm^2 。但各处理硝态氮累积量没有

明显差异。第 2 个生长季期间硝态氮的减少量与第 1 个生长季的相当,0—3 m 土层硝态氮的减少量为 $170.5\text{—}277.5\text{ kg/hm}^2$,其占当季小麦播前土壤硝态氮累积量的比例平均 42%,低于第 1 季(平均 49%)。随残留背景硝态氮累积量的增加,0—3 m 土壤硝态氮减少量占播前硝态氮的比例均有降低的趋势。至第 2 个生长季结束后(2005 年 6 月),0—3 m 土壤中残留的硝态氮为 $212.8\text{—}364.9\text{ kg/hm}^2$ (平均为 319.3 kg/hm^2),占第 1 季小麦播前土壤残留氮的 53%—94%(平均 69%)。种植 2a 小麦后,0—3 m 土层硝态氮减少 $24.0\text{—}314.8\text{ kg/hm}^2$ (平均 158.3 kg/hm^2)(表 1)。

表 1 小麦生长期间 0—3 m 土壤硝态氮的变化
Table 1 Fluctuation of soil residual nitrate of 0—3 m depth in wheat field during 2 years

土壤硝态氮 Soil residual nitrate	残留硝态氮背景 Residual soil nitrate background						平均 Average
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	
第 1 季小麦收获后土壤硝态氮 Residual soil nitrate after wheat harvest	170.1	210.2	274.4	226.5	307.4	227.5	236.0
第 1 季小麦生长期土壤硝态氮的减少量 Reduction of soil nitrate during the first growth season	144.0	163.3	199.1	259.4	236.4	447.4	241.6
硝态氮减少量占播前土壤硝态氮的百分比 Proportion of soil nitrate reduction in residual soil nitrate before wheat sowing/%	46	44	42	53	43	66	49
夏闲期间土壤硝态氮的增加量 Increment of soil nitrate during summer fallow period	317.4	338.2	319.7	332.9	257.6	303.0	311.5
第 2 季小麦播前土壤硝态氮 Residual soil nitrate before wheat sowing of the second growth season	487.5	548.4	594.1	559.4	565.1	530.6	547.5
第 2 季小麦收获后土壤硝态氮 Residual soil nitrate after wheat harvest of the second growth season	212.8	349.5	316.6	312.8	363.9	360.1	319.3
第 2 季小麦生长期土壤硝态氮的减少量 Reduction of soil nitrate during the second growth season	274.6	198.8	277.5	246.7	201.2	170.5	228.2
第 2 季小麦生长期土壤硝态氮减少量占第 2 季小麦播前土壤硝态氮的百分比 Proportion of soil nitrate reduction in residual soil nitrate before wheat sowing of the second growth season	56	36	47	44	36	32	42
2a 间土壤硝态氮的减少量 Reduction of soil nitrate after 2 years	101.3	24.0	156.8	173.1	180.0	314.8	158.3
2a 后土壤硝态氮占第 1 年小麦播前土壤硝态氮的比例 Proportion of soil nitrate after 2 years in nitrate before wheat sowing 2 years ago/%	68	94	67	64	67	53	69

N1、N2、N3、N4、N5、N6 分别代表不同的残留硝态氮量,具体见图 1

2.1.2 苜蓿生长期间土壤硝态氮的消长

在小麦第 1 个生长季后(2004 年 6 月),采集并测定了苜蓿地土壤的硝态氮含量,结果表明,苜蓿地土壤残留硝态氮量同样显著减小:0—3 m 土层硝态氮的减少量为 $127.5\text{—}648.6\text{ kg/hm}^2$ (平均 354.0 kg/hm^2),占播前硝态氮累积量的 41%—73%(平均

53%)。随着土壤播前硝态氮累积量的增加,硝态氮减少量及其占播前硝态氮累积量的比例呈增加趋势,其中 N5 和 N6 处理的硝态氮减少量显著高于 N1—N4 处理 ($P=5\%$),N2—N4 处理的硝态氮减少量显著高于 N1 处理 ($P=5\%$),N5 和 N6 之间、N2、N3 和 N4 之间的硝态氮减少量差异均不显著

(表 2)。

在 2004 年 6 月—10 月间,小麦地处于休闲状态,而苜蓿仍然在生长,0—3 m 土壤硝态氮量增加 91.8—262.6 kg/hm²(平均 197.9 kg/hm²)。N4 和 N5 处理的硝态氮增加量低于其它处理(表 2)。

苜蓿在开始第 2 个生长季之前(2004 年 10 月),0—3 m 土壤硝态氮的累积量比苜蓿播前(2003 年 10 月)显著减少。各处理之间土壤硝态氮累积量没有明显差异。经过第 2 个生长季后(2005 年 6 月),土壤中的硝态氮残留量不降反升;0—3 m 土壤中残留

的硝态氮为 391.3—678.3 kg/hm²(平均为 554.2 kg/hm²),平均比开始第 2 个生长季之前(2004 年 10 月)增加 83.7 kg/hm²。因此,种植 2a 苜蓿后,土壤剖面残留硝态氮同样减少,但减少量显著低于麦田:0—3 m 土层硝态氮平均减少 72.4 kg/hm²,主要是苜蓿播前残留氮累积量高的处理(如 N3、N4、N5 和 N6)减少量较大,而播前残留氮较少的处理(N1 和 N2)2a 后土壤硝态氮量反而增加了 66.1—88.2 kg/hm²(表 2)。

表 2 苜蓿生长期间 0—3 m 土壤硝态氮的变化

Table 2 Fluctuation of soil residual nitrate of 0—3 m in alfalfa field during 2 years

土壤硝态氮 Soil residual nitrate	残留硝态氮背景 Residual soil nitrate background						平均 Average
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	
第 1 生长季后土壤硝态氮/(kg/hm ²) Residual soil nitrate after the first alfalfa growth season	175.6	306.7	267.3	346.0	297.6	242.7	272.6
苜蓿第 1 生长季土壤硝态氮减少量/(kg/hm ²) Reduction of soil nitrate during the first alfalfa growth season	127.5	209.3	249.4	370.2	519.0	648.6	354.0
苜蓿第 1 生长季土壤硝态氮减少量占播前土壤硝态氮的百分比/% Proportion of soil nitrate reduction in residual soil nitrate before wheat sowing	42	41	48	52	64	73	53
苜蓿夏季生长期土壤硝态氮的增加量/(kg/hm ²) Increment of soil nitrate during summer growth season of alfalfa	262.6	213.0	262.2	122.7	91.8	235.1	197.9
苜蓿第 2 生长季开始前土壤硝态氮(2004 年 10 月)/ (kg/hm ²) Residual soil nitrate before alfalfa sowing of the second growth season(Oct. 2004)	438.2	519.7	529.5	468.7	389.4	477.8	470.5
苜蓿第 2 生长季结束后土壤硝态氮(2005 年 6 月)/ (kg/hm ²) Residual soil nitrate after the second alfalfa growth season (Jun. 2005)	391.3	582.1	505.3	583.5	678.2	584.5	554.2
第 2 生长季苜蓿生长期土壤硝态氮减少量/ (kg/hm ²) Reduction of soil nitrate during the second growth season	46.9	-62.4	24.2	-114.8	-195.1	-200.4	-83.6
2a 间土壤硝态氮的减少量 Reduction of soil nitrate after 2 years	-88.2	-66.1	11.3	132.6	138.5	306.8	72.4
2a 后土壤硝态氮占第 1 年小麦播前土壤硝态氮的比例 Proportion of soil nitrate after 2 years in nitrate before wheat sowing 2 years ago /%	129	113	98	81	83	66	95

N1、N2、N3、N4、N5、N6 分别代表不同的残留硝态氮量,具体见图 1

2.2 不同作物的氮素携出量及其与土壤残留硝态氮量的关系

2.2.1 小麦

随着播前土壤中累积硝态氮量的增加,2 个生长季的小麦地上部氮素携出量均呈增加的趋势。第 1 生长季(2003 年 10 月—2004 年 6 月),小麦氮素携

出量占播前土壤硝态氮量的 21%。如果把土壤硝态氮减少量减去作物氮素携出量的值看作土壤硝态氮表观损失的话,那么,播前土壤中硝态氮累积量越高,意味着其表观损失也越大;N6 处理 0—3 m 土壤硝态表观损失量显著高于其他 5 个处理($P=5\%$),

N4 处理的显著高于 N1 和 N2 处理 ($P=5\%$)。第 2 生长季(2004 年 10 月—2005 年 6 月),残留硝态氮量高的处理小麦氮素携出量占土壤硝态氮减少量的

比例则相对较高,0—3 m 土壤硝态氮表观损失量较低(表 3)。

表 3 不同残留氮量条件下的小麦氮素携出量和土壤硝态氮表观损失量

Table 3 N uptake by wheat and soil nitrate apparent loss under different levels of residual nitrate background

残留硝态氮背景 Residual soil nitrate background	N1	N2	N3	N4	N5	N6	平均 Average
第 1 季(2003 年 10 月—2004 年 6 月) First growth season (Oct. 2003—Jun. 2004)							
小麦氮素携出量 N uptake by wheat (kg/hm^2)	63.9	101.2	94.7	85.1	116.5	130.3	98.6
氮素携出量占播前 0—3 m 土壤残留硝态氮量的百分比 Proportion of N uptake in residual nitrate of 0—3 m soil depth before wheat sowing/%	20	27	20	18	21	19	21
0—3 m 土壤硝态氮的表观损失量 Apparent loss of soil nitrate in 0—3 m depth (kg/hm^2)	80.2	62.1	104.4	174.3	119.9	317.1	143.0
第 2 季(2004 年 10 月—2005 年 6 月) Second growth season (Oct. 2004—Jun. 2005)							
小麦氮素携出量 N uptake by wheat (kg/hm^2)	112.0	134.2	135.8	132.3	158.0	164.2	112.0
0—3 m 土壤硝态氮的表观损失量 Apparent loss of soil nitrate in 0—3 m depth (kg/hm^2)	162.6	64.6	141.7	114.4	43.2	6.2	88.8

N1、N2、N3、N4、N5、N6 分别代表不同的残留硝态氮量,具体见图 1

表 4 是小麦氮素携出量与播前土壤残留硝态氮累积量的相关系数。由表可见,第 1 季小麦氮素携出量与小麦播前土壤硝态氮累积量有正相关关系,其中与 0—2 m 和 0—3 m 土层硝态氮累积量的相关性达到显著 ($P=5\%$) 或极显著水平 ($P=1\%$); 3 个不同深度(0—1 m, 1—2 m, 2—3 m) 土层硝态氮累积

量与氮素携出量的相关系数随深度增加而降低。第 2 季小麦氮素携出量与小麦播前(2003 年 10 月)土壤硝态氮累积量的正相关关系仍达到显著或极显著水平。

2.2.2 苜蓿

在第 1 生长季内(2003 年 10 月—2004 年 6 月),苜蓿氮素携出量平均为 $43.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 只占苜蓿播前土壤硝态氮残留量的 4%—11% (平均 7%); 与夏季的氮素携出量总和(2003 年 10 月—2004 年 9 月)也平均只有 $77.6 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 在第 2 个生长季内(2004 年 10 月—2005 年 6 月),苜蓿的氮素携出量高达 $485.2—695.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (平均 $593.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。随着播前 0—3 m 土壤硝态氮残留量的增加,第 1 季苜蓿氮素携出量占播前 0—3 m 硝态氮的比例和占土壤硝态氮减少量的比例均显著降低,硝态氮表观损失量则显著增加(表 5)。

表 4 小麦氮素携出量与第 1 季小麦播前土壤硝态氮累积量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between N uptake by wheat and residual soil nitrate

土壤深度/m Soil depth	第 1 季小麦 The first wheat season	第 2 季小麦 The second wheat season
0—1	0.802	0.799
1—2	0.600	0.699
2—3	0.091	0.192
0—2	0.920 **	0.958 **
0—3	0.857 *	0.919 **

$r(0.05, 4) = 0.811$, $r(0.01, 4) = 0.917$

表 5 不同残留氮条件下的苜蓿氮素携出量和土壤硝态氮表观损失量

Table 5 N uptake by alfalfa and soil nitrate apparent loss under different levels of residual nitrate background

残留硝态氮背景 Residual soil nitrate background	N1	N2	N3	N4	N5	N6	平均 Average
第 1 季(2003 年 10 月—2004 年 6 月) 氮素携出量 N uptake by alfalfa during the first growth season (Oct. 2003—Jun. 2004) (kg/hm^2)							
	32.5	50.8	54.3	40.0	51.0	34.5	43.8
第 1 季(2003 年 10 月—2004 年 6 月) 氮素携出量占播前 0—3 m 土壤残留硝态氮量的百分比 Proportion of N uptake during the first growth season in residual nitrate of 0—3m soil depth before alfalfa sowing/%							
	11	10	11	6	6	4	7

续表

残留硝态氮背景 Residual soil nitrate background	N1	N2	N3	N4	N5	N6	平均 Average
第1季(2003年10月—2004年6月)0—3 m 土壤硝态氮的表观损失量 Apparent loss of soil nitrate in 0—3 m depth during the first growth season/(kg/hm ²)	95.0	158.5	195.1	330.2	468.0	614.1	310.2
第1季+夏季(2003年10月—2004年9月)氮素携出总量 Total N uptake by alfalfa from Oct. 2003 to Sep. 2004/(kg/hm ²)	60.7	92.9	75.1	70.7	89.5	76.8	77.6
第2季(2004年10月—2005年6月)氮素携出量 N uptake by alfalfa during the second growth season (Oct. 2004—Jun. 2005)/(kg/hm ²)	662.5	572.9	695.8	574.9	571.6	485.2	593.8
2季氮素携出量总和(2003年10月—2005年6月) Total N uptake by alfalfa from Oct. 2003 to Jun. 2005/(kg/hm ²)	723.2	665.7	770.9	645.5	661.1	562.1	671.4

N1、N2、N3、N4、N5、N6 分别代表不同的残留硝态氮量,具体见图1

第1生长季苜蓿氮素携出量与播前0—1 m 土壤硝态氮累积量呈显著正相关关系,而与0—3 m 土壤硝态氮累积量线性相关性并不显著。第2生长季苜蓿氮素携出量与播前(第1生长季开始前)土壤硝态氮累积量则呈负相关关系(表6)。

表6 苜蓿氮素携出量与苜蓿播前土壤硝态氮的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between N uptake by alfalfa and residual soil nitrate

土壤深度 Soil depth/m	第1季+夏季 (2003年10月— 2004年10月) 苜蓿氮素携出量 Total N uptake by alfalfa from Oct. 2003 to Sep. 2004	第2季 (2004年10月— 2005年6月) 苜蓿氮素携出量 N uptake by alfalfa during the second growth season (Oct. 2004 to Jun. 2005)
0—1	0.846 *	-0.568
1—2	0.316	-0.435
2—3	0.158	-0.784
0—2	0.652	-0.554
0—3	0.489	-0.716

 $r(0.05, 4) = 0.811$, $r(0.01, 4) = 0.917$

3 讨论与结论

不少研究表明,合理的作物种植是减少土壤硝态氮残留与淋失的重要措施^[16-18]。本研究结果表明,经过一季冬小麦生长,0—3 m 土壤剖面的残留硝态氮可减少42%—66%(平均49%);同一时期如果种植苜蓿,0—3 m 土层硝态氮减少41%—73%(平均53%)。由此可见,秋播作物可有效降低土壤残留硝态氮的数量。然而,由于苜蓿固氮作用较强,在第二

年生长过程中则不仅不能减少土壤中的硝态氮,反而使土壤硝态氮累积量明显增加,因此,如果利用作物来消耗土壤残留硝态氮,苜蓿不宜连续种植。苏涛等报道,夏季种植玉米能显著降低0—2 m 土壤残留硝态氮量^[19]。而本研究发现,夏季生长的苜蓿并不能降低土壤剖面的硝态氮累积量,其原因一方面在于苜蓿的固氮作用,另一方面在于夏季高温高湿条件下土壤有机氮的大量矿化。

不同作物对土壤硝态氮的吸收利用能力有显著差异^[20]。刘晓宏等曾报道,苜蓿连作对土壤剖面硝态氮的利用率高于冬小麦^[8]。然而,本研究表明,在第1季小麦生长期,麦田0—3 m 土层硝态氮的减少量及其占播前残留硝态氮量的比例均低于同期的苜蓿处理,而小麦的氮素携出量(63.9—130.3 kg/hm²)、氮素携出量占播前残留硝态氮量的比例(18%—27%)及氮素携出量占该生长季硝态氮减少量的比例(29%—62%)均显著高于同期的苜蓿处理。这表明冬小麦对残留硝态氮的利用率高于苜蓿,而在种植苜蓿条件下土壤中残留硝态氮移出3 m 土层的数量比小麦田更高。结果不一致的原因可能在于,冬小麦是1年生作物,在生长季内根系就能伸长到4 m 的深层;而苜蓿是多年生作物,虽然6年生紫花苜蓿的根系分布深度可达6 m 以上,但是在第1年内根系生长不超过1.5 m 深^[10]。也就是说,在苜蓿生长的第1年,由于根系生长深度有限,因此,对土壤剖面残留硝态氮的利用能力并不比冬小麦强。在第2个生长季内(2004年10月—2005年6月),苜蓿的氮素携出量达到593.8 kg/hm²,是小麦当季

氮素携出量的近 6 倍,但由于苜蓿固氮作用强烈,与第 2 生长季开始前相比,土壤硝态氮尚有盈余。至第 2 生长季结束后(即 2005 年 6 月),0—3 m 土壤硝态氮量与苜蓿播前相比只减少了 -88.2—306.8 kg/hm²(平均 72.4 kg/hm²),而麦田 0—3 m 土壤硝态氮量与小麦播前相比减少了 24.0—314.8 kg/hm²(平均 158.3 kg/hm²)。由此可见,在短期内(比如 2a)如果想通过种植作物消耗土壤剖面的残留硝态氮,冬小麦比苜蓿更有优势。

本研究结果表明,随着播前 0—3 m 土壤残留硝态氮的增加,小麦地上部氮素携出量呈增加的趋势,两者具有显著正相关;第 1 生长季苜蓿氮素携出量与播前 0—1 m 土壤硝态氮累积量也呈显著正相关关系。但同时,随着播前 0—3 m 土壤残留硝态氮的增加,硝态氮表观损失也显著增加。可见土壤残留硝态氮越多,对后茬作物氮素吸收的贡献越大,但通过淋失等途径损失的风险也越大。因此,严格控制土壤硝态氮的残留量是减少氮素损失的根本措施。

References:

- [1] Ru S H, Zhang G Y, Sun S Y, Geng N, Wang L. Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen distribution, accumulation and crop yields of northern China plain. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6): 172-177.
- [2] Zhao L, Li S Q, Li S X, Zhang X C, Lü L H, Shao M A. Accumulation of soil nitrate nitrogen in the process of ecological and its effects in plant nitrogen nutrition in semiarid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 14-20.
- [3] Roelcke M, Rees R M, Li S X, Richter J. Studies of the nitrogen cycle on the southern edge of the Chinese loess plateau // Laflen J, Tian J, Huang C H, eds. *Proceedings of Conference Soil Erosion and Dryland Farming*, Xi'an, China, Sept. 1997. Chapter 12, CRC Press, Boca Raton (FL), 2000, 103-119.
- [4] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [5] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Pan J R, Christie P. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111-124.
- [6] Zhou S L, Wu Y C, Wang Z M, Lu L Q, Wang R Z. The nitrate leached below maize root zone is available for deep-rooted wheat in winter wheat-summer maize rotation in the North China plain. *Environmental Pollution*, 2007, 152(3): 723-730.
- [7] Ju X T, Gao Q, Christie P, Zhang F S. Interception of residual nitrate from a calcareous alluvial soil profile on the North China Plain by deep-rooted crops: A ¹⁵N tracer study. *Environmental Pollution*, 2007, 146(2): 534-542.
- [8] Liu X H, Hao M D. Effects of long-term plant *Medicago sativa* Linn on soil nitrogen nutrient. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(2): 82-84.
- [9] Chen B, Li J, Li X F. Long term simulation of water potential productivity of alfalfa on rain-fed highland in South of Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3): 31-35.
- [10] Cheng J M, Wan H E, Wang J. Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 435-438.
- [11] Miao G Y, Zhang Y T, Yi J, Hou Y S. A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid loess plateau. *Acta Agronomica Sinica*, 1989, 15(2): 104-115.
- [12] Zhang L J, Ju X T, Gao Q, Zhang F S. Recovery of labeled nitrate-N in different soil layers by two kind of crops. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2): 333-340.
- [13] Kristensen H L, Thorup-Kristensen K. Uptake of ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2—2.5 meters depth. *Plant and Soil*, 2004, 265(1/2): 93-100.
- [14] Guo S L, Zhang W J, Dang T H, Wu J S, Hao M D. Accumulation of NO₃-N in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 584-591.
- [15] 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.
- [16] Beckwith C P. Nitrate leaching loss following application of organic manures to sandy soils in arable cropping I. Effects of application time, manure type, over-winter crop cover and nitrification inhibition. *Soil Use and Management*, 1998, 14(3): 123-130.
- [17] Booltink H W G. Field monitoring of nitrate leaching and water flow in a structured clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, 52(2/3): 251-261.
- [18] Brandi-Dohrn F M, Dick R P, Hess M, Kauffman S M, Hemphill D D Jr, Selker J S. Nitrate leaching under a cereal rye cover crop. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 181-188.
- [19] Su T, Wang Z H, Zai S M, Li S X. Effect of fallow and fertilization on soil mineral nitrogen in summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1078-1082.
- [20] Ren Z H, Chen Q, Li H F, Zhang H Y, Li X L. The progress of controlling nitrate pollution in vegetable fields using nitrogen-catch crops. *Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(7): 13-17.

参考文献:

- [1] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 耿暖, 王凌. 不同施氮量对华北平原作物产量及土体硝态氮分布和累积的影响. 华北农学报, 2012, 27(6): 172-177.
- [2] 赵琳, 李世清, 李生秀, 张兴昌, 吕丽红, 邵明安. 半干旱区生态过程变化中土壤硝态氮累积及其在植物氮素营养中的作用. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 14-20.
- [8] 刘晓宏, 郝明德. 长期种植苜蓿对土壤氮素营养的作用. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 82-84.
- [9] 陈兵, 李军, 李小芳. 黄土高原南部旱塬地苜蓿水分生产潜力模拟研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 31-35.
- [10] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [11] 苗果园, 张云亭, 尹钧, 候跃生. 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.
- [12] 张丽娟, 巨晓棠, 高强, 张福锁. 两种作物对土壤不同层次标记硝态氮利用的差异. 中国农业科学, 2005, 38(2): 333-340.
- [14] 郭胜利, 张文菊, 党廷辉, 吴金水, 郝明德. 干旱半干旱地区农田土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 深层积累及其影响因素. 地球科学进展, 2003, 18(4): 584-591.
- [15] 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 II: 夏玉米. 生态学报, 2002, 22(1): 48-53.
- [19] 苏涛, 王朝辉, 宰松梅, 李生秀. 休闲与施肥对夏玉米生长季节土壤矿质氮的影响. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1078-1082.
- [20] 任智慧, 陈清, 李花粉, 张宏彦, 李晓林. 休闲作物防治菜田土壤硝酸盐污染的研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(7): 13-17.