

DOI:10.11766/trxb202308250340

夏梦洁, 王辉民, 雷霜, 赵梦真, 冯浩, 周建斌. 黄土高原旱地夏闲期残留肥料氮淋溶特性研究[J]. 土壤学报, 2024,
XIA Mengjie, WANG Huimin, LEI Shuang, ZHAO Mengzhen, FENG Hao, ZHOU Jianbin. Leaching Characteristics of Residual Fertilizer
Nitrogen in the Dryland of Loess Plateau During the Summer Fallow Period[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,

黄土高原旱地夏闲期残留肥料氮淋溶特性研究*

夏梦洁^{1,2}, 王辉民^{2,3}, 雷霜², 赵梦真², 冯浩⁴, 周建斌^{2†}

(1. 秦岭国家植物园, 西安 710000; 2. 西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730030; 4. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西杨凌
712100)

摘要: 冬小麦-夏休闲是黄土高原旱地典型的种植模式, 夏闲期间为该地区雨季, 加上土壤表面裸露, 一季作物收获后土壤残留肥料氮的淋失特性是值得关注的问题。在大型渗漏池(3 m×2.2 m×3 m)上采用¹⁵N示踪技术于第一季(2014年)小麦播种前基施¹⁵N肥料(150 kg·hm⁻²), 测定小麦收获后¹⁵N肥料被小麦吸收和土壤残留的量, 之后连续3年(2015—2017年)夏季休闲期间测定第一季小麦收获后土壤中残留的¹⁵N肥料在0~200 cm土壤剖面中的¹⁵N丰度及含量变化, 旨在研究残留肥料氮连续多年在夏季休闲期间的淋溶特性。结果表明, 小麦对当季¹⁵N肥料的利用率(吸收量/施氮量)为53.9%, 一季小麦收获后残留于0~100 cm土壤中的肥料氮平均为施氮量的36.3%。第一年夏季休闲前残留肥料氮主要累积在0~40 cm土层, ¹⁵NO₃⁻-N多累积在80 cm以上土层; 而休闲后60~100 cm土层残留肥料氮显著增加, 80~100 cm土层¹⁵NO₃⁻-N累积量显著增加。随着年限增加, 残留肥料氮及¹⁵NO₃⁻-N持续向土壤深层迁移; 在正常降水条件下, 一个夏季休闲期间残留肥料氮向下迁移的速度平均为20 cm。夏季休闲期间0~100 cm土壤中残留肥料氮减少, 100~200 cm土壤中增加, 同一年休闲前后0~200 cm土壤剖面残留肥料氮累积总量损失小, 说明残留肥料氮在土壤剖面的再分配是其迁移的主要机制。

关键词: 黄土高原旱地; 夏季休闲; 渗漏池; ¹⁵N; 残留肥料氮; 淋溶

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

Leaching Characteristics of Residual Fertilizer Nitrogen in the Dryland of Loess Plateau During the Summer Fallow Period

XIA Mengjie^{1,2}, WANG Huimin^{2,3}, LEI Shuang², ZHAO Mengzhen², FENG Hao⁴, ZHOU Jianbin^{2†}

(1. *Qinling National Botanical Garden, Xi'an 710000, China*; 2. *College of Resources and Environment, Northwest A&F University/Northwest Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3. *CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730030, China*; 4. *College of Soil and Waster Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: 【Objective】 Summer fallow after winter wheat harvest in dryland is a common practice on the Loess Plateau. However, due to bare land and intensive rainfall during summer fallow, the leaching characteristics of residual fertilizer nitrogen (N) after crop harvest deserve attention. This study aimed to reveal that the destination of applied N fertilizer after

*国家自然科学基金项目(42277343, 31372137)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42277343 and 31372137)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 夏梦洁(1990—), 女, 浙江嘉兴人, 博士, 主要从事植物营养与调控。E-mail: xmj629@126.com。

收稿日期: 2023-08-25; 收到修改稿日期: 2023-11-10; 网络首发日期(www.cnki.net):

wheat season and the leaching characteristics of residual N fertilizer during summer fallow in dryland of the Loess Plateau.

【Method】 This study was carried out in large lysimeters (3 m×2.2 m×3 m) by the ^{15}N labeled method. ^{15}N labeled urea was applied at the beginning as basal fertilizer with the rate of 150 kg·hm⁻². Firstly, the absorption of ^{15}N labeled fertilizer by wheat and the residual N in the soil after wheat harvest were investigated, and subsequently the ^{15}N abundance and content changes of residual ^{15}N labeled fertilizer in the soil profile were measured during the summer fallow of three years (2015—2017). 【Result】 The results showed that the average absorption of nitrogen fertilizer by wheat was 53.9% while the amount of ^{15}N fertilizer distributed in the soil (0-100 cm) after wheat harvest was 36.3% of the N application rate, with an average of 40.1% being in nitrate form. In the first year, the residual ^{15}N fertilizer which accumulated in the 0-40 cm soil layer moved downward and accumulated in the 60-80 cm soil layer during the following summer fallow. The $^{15}\text{NO}_3^-$ -N mainly accumulated in the above 80 cm soil layer before summer fallow, but the accumulation peak of $^{15}\text{NO}_3^-$ -N was in the 80-100 cm soil layer at the end of fallow. In the second and third years, the residual ^{15}N fertilizer and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N moved downward about 20 cm, respectively, during summer fallow. After the summer fallow, the amount of residual ^{15}N fertilizer in the 0-100 cm soil layer decreased, but the amount of residual ^{15}N fertilizer and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N in the 100-200 cm soil layer both increased. Specifically, the amount of residual N in the 100-200 cm soil layer increased by 1.9 and 7.0 kg·hm⁻² during the summer fallow of the second and third years, respectively. Also, the amount of $^{15}\text{NO}_3^-$ -N in the 100-200 cm soil layer increased by 2.7 and 7.0 kg·hm⁻² during the summer fallow of the second and third years, respectively. 【Conclusion】 During the summer fallow, residual N fertilizer leached significantly. Under normal precipitation conditions, the average downward migration rate of residual N fertilizer during a summer fallow was 20 cm. As the age increased, the residual N fertilizer in the 0-100 cm soil decreased; while it increased in the 100-200 cm soil layer, with nitrate as the main leached form. However, the cumulative total loss of residual N fertilizer in the 0-200 cm soil profile during summer fallow was small, indicating that the redistribution of residual N fertilizer nitrogen in the soil profile was the main mechanism.

Key words: Dryland on the Loess Plateau; Summer fallow; Lysimeter; ^{15}N ; Residual N fertilizer; Leaching

黄土高原是我国典型旱作区, 干旱缺水、土壤贫瘠是限制作物产量的两个关键因素^[1]。冬小麦-夏季休闲是黄土高原旱地最典型的种植模式^[2], 即小麦收获后翻耕土壤, 以蓄纳雨水, 促进土壤有机质矿化, 增加土壤有效养分含量, 因此, 夏季休闲是黄土高原旱地恢复地力、提高作物产量的传统手段。

20世纪80年代初以来, 黄土高原地区农田氮肥用量开始增加, 以陕西为例, 至2018年小麦生产上氮肥平均用量就达到177 kg·hm⁻²^[3], 其中超过40%的农户施氮量已达200 kg·hm⁻²^[4]。高氮肥投入不仅导致氮肥利用率下降, 还会导致作物收获后大量肥料氮残留于土壤^[5]。李欣欣等^[6]利用 ^{15}N 方法研究表明, 小麦收获后肥料氮在土壤中残留率为30.9%~40.1%; 王盈盈等^[7]发现小麦收获后肥料氮在0~20 cm土层残留占施氮量的22.9%~33.5%。夏季休闲期间(每年6—9月)为该地区雨季, 研究指出黄土高原地区5—9月降水量占全年的比例超过75%^[8], 土壤裸露会显著增加残留肥料氮(尤其是硝态氮)的淋溶损失风险^[9]。20世纪80年代, 彭琳等^[10]最早关注陕西关中夏季休闲对壤土硝态氮淋溶的影响。近年来, 随着氮肥用量不断增加, 夏季休闲期间残留肥料氮(尤其是硝态氮)淋溶损失引起关注^[11]。本课题组研究^[12]表明, 即使夏季休闲期间降水量低于常年同期, 土壤硝态氮仍会发生明显淋溶损失。

目前研究黄土高原旱地夏季休闲期间土壤氮素淋溶的方法主要有差减法^[5,11]和 ^{15}N 示踪法^[12-13]。前者采用比较休闲前后土壤剖面矿质氮含量来估算休闲前后氮素淋溶损失, 难以区分淋溶氮素的来源。 ^{15}N 示踪法可定量肥料氮去向, 是跟踪肥料氮去向的有效方法^[14]。而已有的关于黄土高原夏季休闲期间肥料氮淋溶的研究均采用 ^{15}N 标记田间微区法^[12-13], 其优点为试验便于管理、成本相对较低, 但存在人为扰动形成大孔隙, 尤其是沿着管壁加速水、氮运移的可能; 同时微区深度一般不超过60 cm, 存在标记肥料氮的侧向移动^[14], 可能高估肥料氮的淋失; 且多为一季的研究结果, 难以反映不同年际的效应^[12-13]。因此, 有必要采取更有效方法研究黄土高原旱地小麦不同年份夏季休闲期间残留肥料氮的淋失特性。大型渗漏池能较好地还原大田的生长环境, 大大降低水、氮沿池壁缝隙下渗带来的问题, 也便于后续开展多年的研究, 有效避免了差减法和微区法的不足。为此, 本研究利用大型渗漏池与 ^{15}N 示踪法相结合的方法连续三年研究了黄土高原旱地冬小麦-夏休闲种植模式下夏季休闲期间残留肥料氮的淋溶特性, 旨在为旱地氮肥合理施用、减少氮素损失等问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点位于陕西省杨凌示范区, 该区属于半湿润气候区, 年均温12.9 °C, 年均降水量和蒸发量分别为635 mm和1 500 mm。试验用渗漏池建于2011年, 位于西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院(34°18' N, 108°40' E)。渗漏池长、宽及深分别为3 m×2.2 m×3 m, 四周用25 cm厚混凝土浇筑, 以阻隔渗漏池之间土壤水分和养分交换, 同时为防止池内外土表径流, 四周池壁上部高出周围土面5 cm。建造渗漏池前先将3 m土壤按20 cm一层分层挖出, 待四周池壁浇筑完成后将土壤逐层回填, 使回填后土壤容重与之前相同。每个渗漏池分别在0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1、1.5和1.9 m深度安置陶土头以收集降水/灌溉后的土壤淋出液。每个渗漏池底部均设有过滤层和排水设备(图1)。

渗漏池建成后所有渗漏池采用统一种植与施肥、灌水措施, 以稳定土壤结构。种植模式为冬小麦-夏玉米轮作, 2011年第一季作物种植前施用商品有机肥(5 050 kg·hm⁻², 有机质大于等于30%, N+P₂O₅+K₂O ≥5.0%) 和氮肥(210 kg·hm⁻²), 2012—2014年仅施用氮肥(210 kg·hm⁻² (以N计, 下同)) 和磷肥(100 kg·hm⁻² (以P₂O₅计, 下同)) 提高土壤肥力。作物生长期足量灌溉保证作物正常生长。

试验开始时供试土壤为壤土(土垫早耕人为土), 黏粒、粉粒和砂粒体积百分数分别为22%、51%和27%。0~100 cm土壤容重分别为1.20、1.22、1.22、1.24及1.25 g·cm⁻³(每20 cm)。0~20 cm土壤pH、有机质、有效磷、速效钾分别为8.2、12.6 g·kg⁻¹、23.0 mg·kg⁻¹、136 mg·kg⁻¹。0~100 cm土壤剖面全氮分别为1.02、0.95、0.93、0.62和0.54 g·kg⁻¹(每20 cm), 矿质态氮分别为16.1、16.2、24.3、38.6和44.5 mg·kg⁻¹(每20 cm)。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验采取冬小麦-夏季休闲种植模式, 设不施氮(N0)和施氮 150 kg·hm⁻²(N150, 参考渭北旱塬冬小麦生产推荐施氮量^[15])2 个处理, 各处理均施等量磷肥(100 kg·hm⁻²), 不施钾肥, 重复3次。第一季小麦施用¹⁵N 标记尿素(10.16 atom%, 上海化工研究院生产), 于2014年10月26日播种, 播种量150 kg·hm⁻², 每个渗漏池10行; 施用的氮、磷肥在播种前均匀撒施, 然后与表层15 cm土壤翻耕使肥料与土壤均匀混合。小麦于2015年6月8日收获, 进入夏季休闲阶段。之后两年除用普通尿素代替¹⁵N 标记尿素外, 其他试验操作同第一年。

渗漏池上方装有电机牵引的三层折叠式遮雨棚(48 m长, 10 m宽, 4 m高), 在降水前遮雨棚会关闭阻挡自然降水, 因此在试验期间(小麦季和夏季休闲)均用等量灌溉代替自然降水。2015—2017年夏季休闲期间和多年同期降水量见图2。

1.2.2 土壤样品采集 2015年6月8日和10月4日进行第一个夏季休闲前后土壤样品采集, 每个渗漏池采集两个1 m土壤剖面样品, 每20 cm为一层, 两钻混匀带回实验室做后续测定。同时, 在渗漏池外采集两个相同直径和深度的土壤剖面回填采样孔以减少对渗漏池土体的影响。土壤样品用四分法1/2过2 mm筛测定土壤矿质态氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)含量以及¹⁵N丰度; 另1/2风干磨细过筛测定土壤全氮及¹⁵N丰度。2016年6月3日和10月13日进行第二个夏季休闲前后土壤样品采集; 2017年6月3日和10月8日进行第三个夏季休闲前后土壤样品采集。后两年采样和测定操作同第一年, 采样深度分别加深至1.8 m和2 m。

1.2.3 样品测定 土壤全氮用H₂SO₄ 消煮—半微量凯氏法测定, 土壤样品¹⁵N丰度在磨细过筛后直接用同位素比值质谱仪(EA-IRMS, PDZ Europa 20-20, Sercon Ltd, Cheshire, 英国)测定。土壤硝态氮和铵态氮用1 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提(水土比10:1), 自动化连续流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe, 德国)测定。矿质态氮¹⁵N丰度采用氨扩散法^[16]收集, 具体方法为, 取适量浸提液(含氮100 μg左右), 放入扩散容器中, 将加有30 μL 2.5 mol·L⁻¹ KHSO₄的玻璃纤维滤纸挂在扩散容器中(始终不接触浸提液), 向浸提液中加入0.4 g戴氏合金, 再加入2 mL 5 mol·L⁻¹ NaOH, 迅速密封扩散容器, 在培养箱25 °C下放置1周。7 d后取出玻璃纤维滤纸, 干燥后用锡囊包裹, 用同位素比值质谱仪测定, 本研究通过实际测定发现土壤样品矿质态氮主要为硝态氮, 平均占矿质态氮总量的95.2%, 因此本文中直接用矿质态氮的¹⁵N丰度来表示硝态氮¹⁵N丰度。所有¹⁵N丰度测定均在美国加州大学戴维斯分校同位素分析中心完成。

1.3 数据处理

不同土壤氮库中¹⁵N来源于¹⁵N肥料的量(Ndff/(kg·hm⁻²))计算公式如下:

$$Ndff/(kg \cdot hm^{-2}) = Cs \times (Es/Ef)$$

式中, Cs为不同氮库中氮含量, kg·hm⁻²; Es为土壤不同氮库¹⁵N原子百分超, %; Ef为¹⁵N标记尿素原子百分数, %。

数据计算采用Excel2007, 数据统计分析采用SPSS20.0, 图表绘制采用Excel2007和SigmaPlot12.0。单因素方差分析用来检验施氮处理土壤δ¹⁵N与土壤背景值之间差异显著性(P<0.05)。

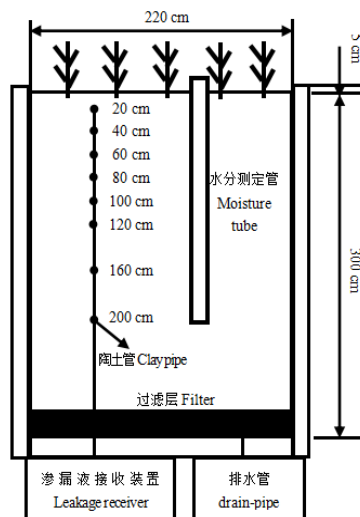
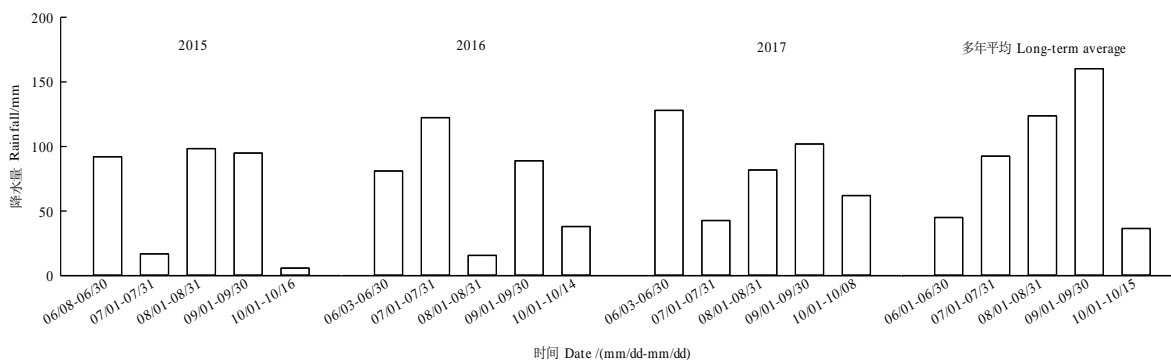


图1 渗漏池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lysimeter



注: 数据来源: 中国气象局国家气象中心。Note: Date source: National Meteorological Center of China Meteorological Agency (<http://www.nmc.cn>)

图2 2015—2017年杨凌夏季休闲期间及多年(1957—2017)同期降水量

Fig. 2 Rainfalls in summer fallow in 2015—2017 in Yangling and 1957—2017

2 结果

2.1 小麦收获后当季肥料氮残留量

考虑到采用¹⁵N可较准确定量肥料氮残留量以及渗漏池间可能存在的差异, 将施氮处理的3个重复结果分别列出(表1)。可见第一季小麦收获后施氮处理土壤(0~100 cm)残留肥料氮量分别为39.8、70.1和52.7 kg·hm⁻², 占施氮量的26.5%、46.7%和35.1%, 平均为36.3%; 其中以硝态氮形态存在的量分别为13.9、31.8和21.1 kg·hm⁻², 分别占当季土壤残留量的34.9%、45.4%和40.0%, 平均为40.1%。

表 1 第一季小麦收获后土壤残留 ^{15}N 肥料和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N 量

Table 1 Total residual ^{15}N and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N in soil after wheat harvest/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

渗漏池编号 Lysimeter number	残留 ^{15}N Residual ^{15}N	残留 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N Residual $^{15}\text{NO}_3^-$ -N
Lys2	39.80	13.91
Lys3	70.08	31.84
Lys6	52.74	21.08

注: Lys2、Lys 3、Lys 6 是 N150 处理的三个重复。下同。Note: Lys2, Lys 3, and Lys 6 are replicates of N150 treatment. The same as below.

2.2 夏季休闲前后残留肥料氮在剖面累积及迁移变化

由图3可知, 第一年夏季休闲前0~20 cm土层残留肥料氮最多, 并随着土壤剖面逐层降低, 休闲后0~20 cm土层残留肥料氮含量降低并在40~60 cm出现一个累积峰。 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N则从40 cm迁移至60 cm以下。第二年休闲期间, 表层残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积量均减少, 60~100 cm土层残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积量增加, 残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积前沿下移20 cm。第三年休闲后, 60~140 cm土层残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积量较休闲前增加, 残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积前沿下移20 cm。

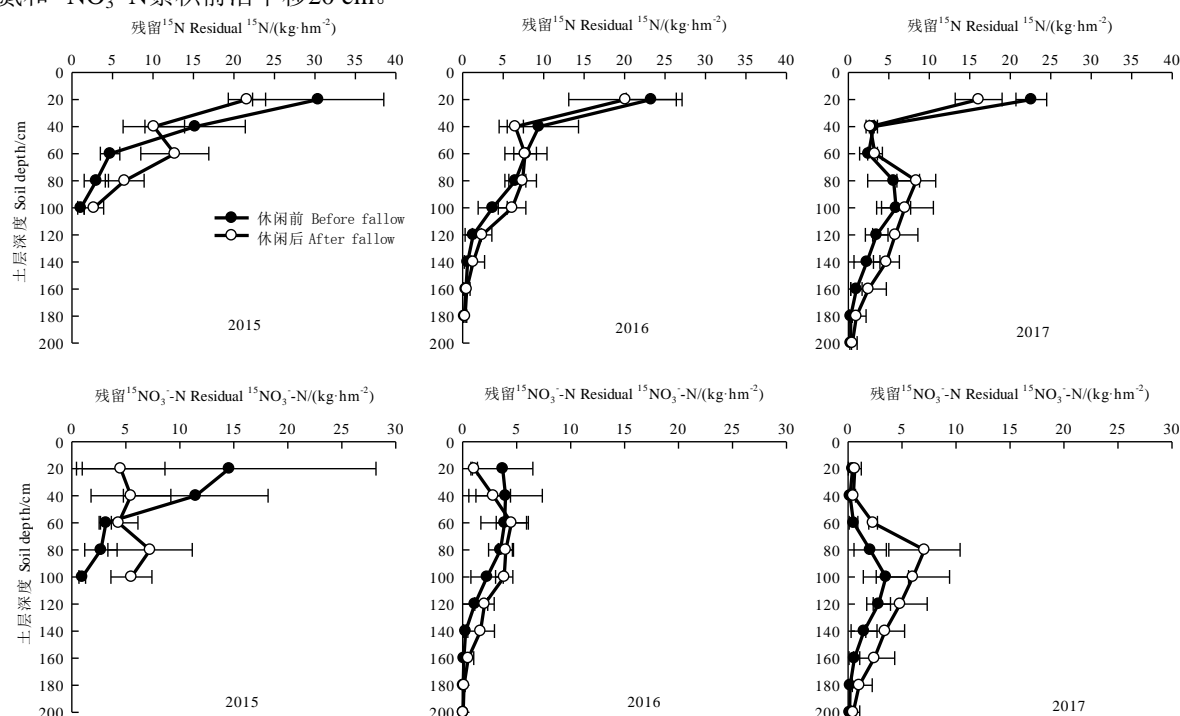
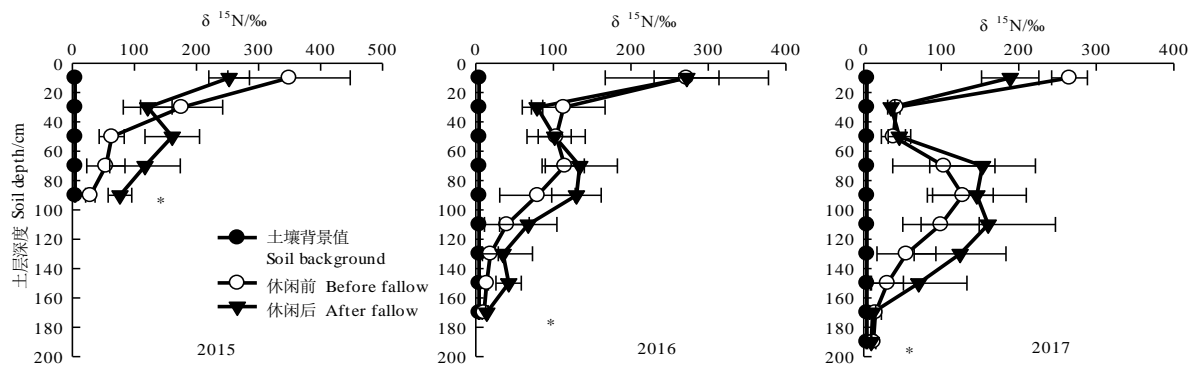


图 3 2015—2017 年夏季休闲前后施氮处理 0~200 cm 土壤剖面残留氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N 的分布

Fig. 3 Distribution of total residual ^{15}N and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N in 0-200 cm soil profile of N150 treatment before and after summer fallow in

2015—2017

土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 背景值为4‰左右, 由于给土壤施用 ^{15}N 标记的肥料氮, 因此, 与 ^{15}N 丰度表示法相比, $\delta^{15}\text{N}$ 法更易反映标记肥料氮在土壤剖面的迁移情况。从图4可看出, 第一年休闲前土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值表层最高, 随着土层深度不断降低; 与休闲前相比, 休闲后0~40 cm土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著降低, 而40 cm以下土层 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高, 且在100 cm处 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于休闲前。第二年休闲前后表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化不显著, 但休闲后80~160 cm土层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值较休闲前升高。第三年休闲后相比于休闲前, 60~180 cm范围土层 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加显著, $\delta^{15}\text{N}$ 峰值下移20 cm。



注: *表示同一土层 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 背景值差异显著, $P < 0.05$ 。Note: *stands significant differences between $\delta^{15}\text{N}$ of N150 treatment and the $\delta^{15}\text{N}$ background value in the same layer, $P < 0.05$ 。

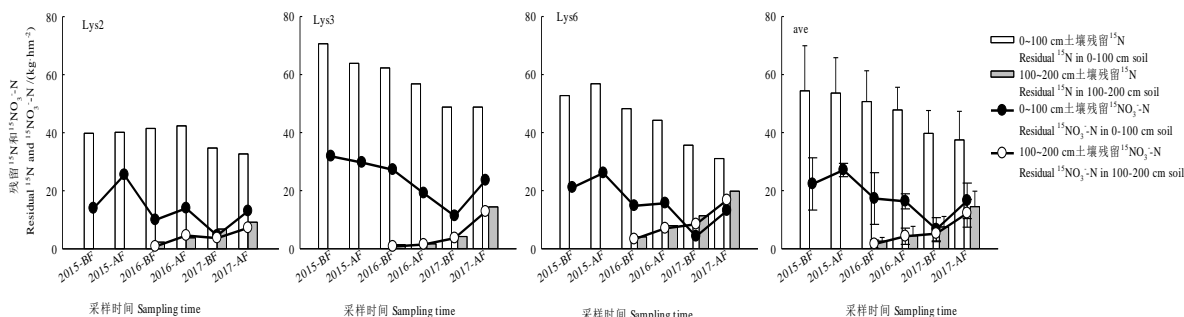
图 4 2015—2017 年夏季休闲前后施氮处理 0~200 cm 土壤剖面 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Fig. 4 Soil $\delta^{15}\text{N}$ value of N150 treatment in 0-200 cm soil profile before and after summer fallow in 2015—2017

2.3 夏季休闲前后残留肥料氮在 0~100 及 100~200 cm 累积量变化

从图5可以看出,三个施氮小区不同年份0~100 cm土层残留肥料氮量随种植年限整体呈下降趋势,而100~200 cm土层残留肥料氮量随种植年限则呈上升趋势,说明残留肥料氮向100 cm以下土层的淋溶随种植年限而增加。

与每年休闲前相比,施氮处理100~200 cm土层残留肥料氮量均呈增加趋势,说明夏季休闲促进了残留肥料氮向100 cm以下土层的淋溶。与休闲前相比,除Lys3小区2015及2016年外,其他两个小区各年份及Lys3小区2017年休闲后0~100 cm土层 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积均呈增加趋势,增加量范围在0.90~12.27 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均为7.28 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这可能与夏季休闲促进了以有机态残留的肥料氮矿化有关;与休闲前相比,施氮处理100~200 cm土层残留 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积均呈增加趋势,其中第二、三年100~200 cm土壤中 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N累积平均增加量分别为2.74、6.99 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明休闲增加了残留 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N的淋溶。



注: BF 为休闲前, AF 为休闲后, ave 为三个重复的平均值。Note: BF is before fallow, AF is after fallow, ave is the average of the three replicates.

图 5 2015—2017 年夏季休闲前后 0~100 cm 和 100~200 cm 土壤剖面中残留肥料氮和 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N 的累积量

Fig. 5 Amount of residual ^{15}N and $^{15}\text{NO}_3^-$ -N in 0-100 cm and 100-200 cm soil profile before and after summer fallow in 2015—2017

3 讨论

3.1 旱地肥料氮残留及夏季休闲期间的淋溶特性

本研究表明,施入土壤的肥料氮一季小麦收获后残留在土壤(0~100 cm土层)的数量占施氮量比例在26.5%~46.7%之间(平均36.3%),这与其他学者研究结果^[6,17]类似。本研究氮肥用量为150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,属合理施肥量水平,而黄土高原旱地生产实践中过量施用氮肥仍较为普遍^[18],一季作物收获后土壤肥料氮残留随施肥水平增加而增加。因此,一季作物收获后残留于土壤的肥料氮无疑是一个不可忽视的氮库。本研究同时测定了土壤全氮和以硝态氮形态残留的肥料氮,发现以硝态氮形态残留的肥料氮占比在

34.9%~45.4%之间(平均40.1%)。可见,黄土高原旱地冬小麦-夏休闲种植模式在一季小麦收获后土壤残留肥料氮量高,且残留氮以硝态氮形态存在占比高,无疑增加了夏季休闲期间残留肥料氮的淋失风险。

施入耕层的肥料氮在一季小麦收获后其在土壤剖面分布前沿就已达100 cm左右(图3,图4)。与休闲前相比,第一年夏季休闲后残留氮向下淋溶明显,随年限增加,100~200 cm土壤剖面中的累积量不断增加(图5),且80%以上以硝态氮存在,说明黄土高原旱地冬小麦-夏休闲种植模式下夏季休闲加速了残留肥料氮的淋溶损失,这与夏季休闲期间地表裸露加上降水集中有关。

本研究还发现,夏季休闲期间土壤残留氮(尤其是硝态氮)淋溶受到降水量和分布深度的双重作用。第一年夏季休闲期间降水量为308 mm,休闲期间累积峰从0~40 cm下移至40~60 cm;第二、三年夏季休闲期间残留肥料氮分别在337 mm和402 mm降水作用下向下淋溶了20 cm(图3),100~200 cm土层中残留肥料氮累积量分别平均增加了1.9和7.0 kg·hm⁻²,平均每10 mm降水使残留肥料氮下移累积至100~200 cm土层中的量为0.056~0.174 kg·hm⁻²。第三年休闲期间降水量较第一、第二年高(图2),但是残留氮累积峰向下淋溶深度并未增加(图3),这是因为累积深度越深,下移难度增大,与前人的研究结果^[19-20]一致。

冬小麦-夏休闲是黄土高原渭北、陇东及晋中南等旱地主要的种植模式,在我国旱地小麦生产中也占有重要作用。休闲期间降水量及单次降水强度无法控制,为减少夏季休闲期间残留肥料氮的淋溶损失,建议采取“源头减量与过程拦截”相结合的综合防控措施,包括:(1)应合理施用氮肥、提高氮肥利用率,降低一季作物收获后土壤残留肥料氮数量,从源头上降低肥料氮的淋失;(2)采取有机无机配施(包括秸秆还田)方式,提高土壤固持氮素能力;(3)在降水量相对较高地区,夏季休闲期间种植填闲作物,通过作物对氮素及水分吸收,降低残留肥料氮损失。

3.2 夏季休闲期间土壤残留氮肥损失及效应

本研究表明,夏季休闲期间0~100 cm土壤剖面残留氮肥累积量减少,100~200 cm土壤剖面残留氮肥累积量增加,0~200 cm土壤剖面的总量损失小(图5),该结果不同于已有的研究结论^[10-11],认为夏季休闲期间残留氮肥损失高。出现该情况,首先与研究采用的方法不同有关。目前关于黄土高原旱地夏季休闲期间残留氮肥(主要是硝态氮)损失的研究多采用差减法^[10-11,21],仅能得到土壤剖面残留氮的表观变化,无法定量其损失。以2016、2017年为例,本研究中利用差减法计算得到夏季休闲结束后0~100 cm土壤剖面硝态氮平均增加量分别为-7.5 kg·hm⁻²和228.6 kg·hm⁻²,100~200 cm土壤剖面分别为-17.9 kg·hm⁻²和128.4 kg·hm⁻²;而利用¹⁵N示踪法获得0~100 cm土壤剖面硝态氮平均增加量分别为-1.0 kg·hm⁻²和9.8 kg·hm⁻²,100~200 cm土壤剖面为2.7 kg·hm⁻²和7.0 kg·hm⁻²(图5)。可见相同的试验条件下,¹⁵N示踪法和差减法得到的结果差异明显,显然要定量研究第一季施入氮肥的变化情况¹⁵N示踪法更为准确。相比于¹⁵N标记试验的精细化,很多非¹⁵N标记研究在面积较大田块中进行,休闲前后采样点的位置偏差大,土壤是不均匀介质,会导致研究结果差异大。然而利用¹⁵N微区法可能存在人为扰动形成大孔隙,尤其是沿着管壁加速水、氮运移;同时微区隔离框深度一般不超过60 cm,难以阻断标记肥料氮的侧向移动^[15],以上这些均可能过高估计肥料氮的损失。本研究为减少上述因素带来的偏差,采用建成后稳定三年大型渗漏池,面积大(2.2 m×3 m×3 m),降低了水、氮沿池壁缝隙下渗带来的影响,同时四周的池壁消除了侧渗。其次,这与淋溶损失深度定义差异有关。研究指出小麦根系在100 cm以下土壤中的根长密度显著降低^[22],吸收养分能力弱,但另有相关研究指出累积在100 cm土层之下的残留肥料氮仍可能被后茬作物吸收利用^[23],尤其是生长在黄土高原上的旱地小麦,深厚的黄土层为残留肥料氮的吸收利用提供了基础。但若残留肥料氮进一步淋失,可能进入土壤包气带(地面以下潜水面以上的地带),再进一步流失进入潜水层或河流湖泊,导致水体污染^[24-25],进而带来环境问题。因此,应从植物营养及环境两个方面关注黄土高原旱地残留肥料氮的去向及效应。

氮肥施入土壤后可能发生气态损失主要包括氨挥发、硝化反硝化生成N₂O和N₂损失^[26]。由于氨挥发持续在施肥后1周左右,之后氨挥发变化趋势不明显^[27],所以经过一个小麦生长季后残留氮肥在夏季休闲期间氨挥发可能性低。而土壤中反硝化作用的发生需同时满足硝态氮累积、通气不良及有效的有机碳源几个条件^[28]。夏季休闲有助于提高土壤剖面硝态氮含量(图3,图5),加上这期间降水集中,尤其是出现单次极端降水可能影响土壤通气状况,有效碳源不足可能影响夏季休闲期间反硝化作用的发生。从夏季休闲期间0~200 cm土壤剖面残留氮肥累积总量损失小(图5),也证明反硝化作用弱。可见黄土高原旱地夏季休闲期间残留氮肥发生气态损失低,残留肥料氮被作物吸收及在土壤剖面的再分配是其迁移的主要机制。

4 结论

一季小麦收获后残留于土壤中的肥料氮数量占施氮量比例平均为36.3%,而残留肥料氮中硝态氮占比

平均为40.1%。夏季休闲期间残留肥料氮向下淋溶明显, 随年限增加, 100~200 cm土壤剖面中的累积量不断增加, 且80%以上为硝态氮形态。同年夏季休闲前后0~200 cm土壤剖面残留肥料氮累积总量损失小, 主要是在土壤剖面进行再分配, 以深层累积为主。

参考文献 (References)

- [1] Shan L. Issues in dryland agricultural research in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 2-4. [山仑. 我国旱地农业发展中的几个问题[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 2-4.]
- [2] Shan L. Development trend of dryland farming technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 848-855.[山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 848-855.]
- [3] Mi X T, Shi L, He G, et al. Fertilizer reduction potential and economic benefits of crop production for smallholder farmers in Shaanxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(20): 4370-4384.[米晓田, 石磊, 何刚, 等. 陕西省小农户作物生产的减肥潜力及经济效益评价[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(20): 4370-4384.]
- [4] Cao H B, Wang Z H, He G, et al. Tailoring NPK fertilizer application to precipitation for dryland winter wheat in the Loess Plateau[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 88-95.
- [5] Dai J, Wang Z H, Li M H, et al. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 180-190.
- [6] Li X X, Shi Z L, Wang J C, et al. Characteristics of uptake, residual and loss of nitrogen fertilizer in winter wheat after rice stubble[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3691-3699.[李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 稻茬冬小麦氮肥吸收、残留和损失特性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3691-3699.]
- [7] Wang Y Y, Xia L L, Cai S Y, et al. Long-term fate and availability of residual fertilizer nitrogen in rice-wheat cropping system in Taihu Lake Region of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6): 1626-1639.[王盈盈, 夏龙龙, 蔡思源, 等. 长期不施氮肥下稻麦轮作农田残留化肥氮的后效及去向[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1626-1639.]
- [8] Ren Q, Gong Y F, Liu X Y. Temporal and spatial variation characteristics of daytime and nighttime precipitation in monsoon and westerly regions of the Loess Plateau from 1961 to 2020[J/OL]. *Plateau Meteorology*, 2023, DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2023. 00009.[任琦, 巩远发, 刘雪宇. 1961-2020年黄土高原季风区和西风区昼夜降水的时空变化特征[J/OL]. *高原气象*, 2023, DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2023. 00009.]
- [9] Huddell A, Ernfors M, Crews T, et al. Nitrate leaching losses and the fate of ¹⁵N fertilizer in perennial intermediate wheatgrass and annual wheat - A field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857(P1): 159255.
- [10] Peng L, Peng X L, Lu Z F. NO₃⁻-N seasonal change in dryland and fertilization production role during summer fallow of Lou Soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1981, 18(3): 211-222.[彭琳, 彭祥林, 卢宗藩. 塬土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J]. *土壤学报*, 1981, 18(3): 212-222.]
- [11] Xia M J, Ma L L, Shi Q Y, et al. The Relationship of NO₃⁻-N leaching and rainfall types during summer fallow in the Loess Plateau dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1537-1546.[夏梦洁, 马乐乐, 师倩云, 等. 黄土高原旱地夏季休闲期土壤硝态氮淋溶与降水年型间的关系[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(8): 1537-1546.]
- [12] Xia M J, Chen Z J, Liu Z J, et al. Fate of ¹⁵N labeled nitrate in dryland under summer fallow on the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1230-1239.[夏梦洁, 陈竹君, 刘占军, 等. 黄土高原旱地夏季休闲期 ¹⁵N 标记硝态氮的去向[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1230-1239.]
- [13] Xia M J, Chen Z J, Gao J B, et al. Summer fallow increases loss of residual nitrogen fertilizer in dryland of the Loess Plateau: A ¹⁵N-labeled method[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 34155-34163.
- [14] Follett R F. Innovative ¹⁵N microplot research techniques to study nitrogen use efficiency under different ecosystems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 951-979.
- [15] Liu F, Tong Y A, Wang X Y, et al. Effects of N, P and K fertilization on wheat yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 552-558. [刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 552-558.]

- [16] Sebilo M, Mayer B, Grably M, et al. The use of the 'ammonium diffusion' method for $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ measurements: Comparison with other techniques[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 1(2): 99-103.
- [17] Yin H J, Kong L T, Wang R R, et al. Fate and efficiency of fertilizer nitrogen in spring wheat production under drip irrigation based on the ^{15}N tracing method [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 414-426.[尹豪杰, 孔丽婷, 王荣荣, 等. 基于 ^{15}N 标记的干旱区滴灌肥料氮的去向和效益研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3): 414-426.]
- [18] Zhao H B, Wang Z H, Gao Y J, et al. Investigation and evaluation of household wheat fertilizer application in Shaanxi Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 245-253.[赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 245-253.]
- [19] Zhang L J, Ju X T, Zhang F S, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964-1972.[张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1964-1972.]
- [20] Zhang J T, Wang Z M, Liang S B, et al. Quantitative study on the fate of residual soil nitrate in winter wheat based on a ^{15}N -labeling method[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171014.
- [21] Lv Z C. Study on water and fertilizer yield effect and fungal diversity of planting green manure in summer fallow period of wheat field in Loess Plateau[D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2021.[吕卓呈. 黄土旱塬麦田夏闲期种植绿肥的水肥产量效应及真菌多样性研究[D]. 山西太原: 山西农业大学, 2021.]
- [22] Wang Y Z, Shao L W, Liu X W, et al. Optimization of root sampling sites and modeling root length density distribution for wheat and maize[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(4): 365-372.[王艳哲, 邵立威, 刘秀位, 等. 小麦和玉米根系取样位置优化确定及根系分布模拟[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 365-372.]
- [23] Asseng S, Richter C, Wessolek G. Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190:267-277.
- [24] van Meter K J, van Cappellen P, Basu B N. Legacy nitrogen may prevent achievement of water quality goals in the Gulf of Mexico[J]. *Science*, 2018, 360(6387): 427-430.
- [25] Niu X S, Zhang C, Ju X T. Mechanism of nitrogen leaching in fluvo-aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 53-65.[牛新胜, 张翀, 巨晓棠. 华北潮土冬小麦-夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(1): 53-65.]
- [26] Battye W, Aneja V P, Schlesinger W H. Is nitrogen the next carbon?[J]. *Earth's Future*, 2017, 5(9): 894-904.
- [27] Wang L, Dong S T, Liu P, et al. The interactive effects of water and nitrogen addition on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1919-1927.[王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦田氨挥发损失和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1919-1927.]
- [28] Lang M, Li P, Wei W. Gross nitrogen transformations and N_2O emission sources in sandy loam and silt loam soils[J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(5): 487-499.

(责任编辑: 陈荣府)