

旱地矮化苹果园当季氮肥在土壤剖面的累积与淋溶效应

李 蓉,王怡琳,屈红超,朱志军,张子豪,张 浩,蒋 锐

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为研究旱地矮化苹果树当季肥料氮在土壤中的累积与淋溶效应,采用土钻采样法与¹⁵N 同位素示踪技术,测定了 6 a 生晚熟矮化‘延长红’苹果园土壤剖面(0~300 cm)的氮素累积分布特征与当季氮肥残留。结果表明:土壤含水率与硝态氮含量变化表现出较强的一致性,不施肥 CK、减氮施肥 N400 与常规施肥 N800 处理硝态氮在 80~140 cm 土层存在明显富集现象,其含量峰值分别为 174.9、194.8 mg·kg⁻¹与 211.1 mg·kg⁻¹。CK、N400 与 N800 处理 0~300 cm 土壤剖面中,全氮累积量分别为 10 927.3、13 734.8 kg·hm⁻²与 15 645.4 kg·hm⁻²,硝态氮累积量分别为 1 873.5、2 353.9 kg·hm⁻²与 2 892.7 kg·hm⁻²,铵态氮累积量分别为 12.2、42.6 kg·hm⁻²与 44.4 kg·hm⁻²。N400 和 N800 处理下果园土壤中各土层(0~300 cm)氮素来自当季氮肥的比例分别为 0.10%~1.50%和 0.18%~2.03%。当季氮肥在 0~300 cm 深度各土层均有残留且主要集中在 0~140 cm 土层;80~100 cm 土层的全氮来自当季氮肥的比例(减氮施肥 N400 和常规施肥 N800 分别为 1.50%与 2.03%)显著高于其他土层。N400 处理下 TN-¹⁵N、NO₃⁻-¹⁵N、NH₄⁺-¹⁵N 的残留率分别为 21.6%、19.2%、0.2%,N800 处理分别为 48.8%、39.3%、0.3%,土壤中氮的残留率随着施氮量的增加显著增加,且以硝态氮为主。100~300 cm 土层中减氮施肥 N400 与常规施肥 N800 处理 NO₃⁻-¹⁵N 残留率分别为 8.5%与 25.0%,当季氮肥淋溶出根区(0~80 cm)现象明显。最佳施肥量及施肥量对产量的影响在 N400 的基础上仍有待进一步研究确定。

关键词:苹果;¹⁵N;施氮量;硝态氮
中图分类号:S158.5;S661.1 **文献标志码:**A

Accumulation and leaching effects of seasonal nitrogen fertilizer in the soil profile of dryland dwarf apple orchards

LI Rong, WANG Yilin, QU Hongchao, ZHU Zhijun, ZHANG Zihao, ZHANG Hao, JIANG Rui
(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To study the accumulation and leaching of seasonal nitrogen (N) fertilizer in dryland dwarf apple trees, soil auger sampling and ¹⁵N isotope tracing techniques were used to determine the nitrogen accumulation distribution characteristics and seasonal N fertilizer residues in the soil profile (0~300 cm) of six-year-old late-maturing dwarf ‘Yanchanghong’ apple orchards. The results showed that soil water content and nitrate-nitrogen content had a strong similar trend. Nitrate-nitrogen was significantly enriched in the 80~140 cm soil layer in CK, N400 and N800 treatments, with peaks of 174.9, 194.8 mg·kg⁻¹ and 211.1 mg·kg⁻¹ respectively. In the 0~300 cm soil profiles of the CK, N400 and N800 treatments, the accumulation of total N was 10 927.3, 13 734.8 kg·hm⁻² and 15 645.4 kg·hm⁻², the accumulation of nitrate was 1 873.5, 2 353.9 kg·hm⁻² and 2 892.7 kg·hm⁻², and the accumulation of ammonium N was 12.2, 42.6 kg·hm⁻² and 44.4 kg·hm⁻², respectively. The proportion of nitrogen from seasonal N fertilizer in the orchard soil (0~300 cm) ranged from 0.10% to 1.50% in the N400 treatment and from 0.18% to 2.03% in the N800 treatment. The proportion of total nitrogen from seasonal nitrogen fertilizer was significantly higher in the 80~100 cm layer (1.50% and 2.03% for N400 and N800, respectively) than in

the other layers. The residual rates of $\text{TN}-^{15}\text{N}$, $\text{NO}_3^{-}-^{15}\text{N}$ and $\text{NH}_4^{+}-^{15}\text{N}$ were 21.6%, 19.2% and 0.2% under N400 treatment and 48.8%, 39.3% and 0.3% under N800 treatment, respectively, and the residual rates of N in the soil increased significantly with the increase of applied N, and were mainly nitrate N. The residual rates of $\text{NO}_3^{-}-^{15}\text{N}$ in the 100~300 cm soil layer were 8.5% and 25.5% for N400 and conventional N800 treatments, respectively. The N fertilizer leaching out of the root zone (0~80 cm) in the season was obvious. The optimum fertilizer application rate and the effect of fertilizer application rate on yield are still to be determined on the basis of N400.

Keywords: apple; ^{15}N ; N application rate; nitrate nitrogen

由于日照时间长、昼夜温差大和土层深厚等自然优势,黄土高原成为我国四大苹果主产区之一^[1]。陕西作为黄土高原苹果主产省份之一,2020 年苹果栽植面积高达 $6.14\times 10^5\text{ hm}^2$,产量达 1 135 万 t,面积和产量均占到全国的 1/4^[2]。由于黄土高原水土流失严重,果园土壤肥力低下^[3],近 20 a 来氮肥施用成为该地区促进果树生长发育、提高产量和改善果实品质的重要手段^[4]。然而随着苹果产业发展日趋迅猛,果农盲目追求经济效益,过量施用氮肥问题日益严重。据调查,黄土高原苹果园施氮量维持在 $400\sim 1\,300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[5]。过量的氮肥投入导致了相当严重的土壤硝酸盐深层累积问题^[2,6-9]。

近年来,黄土高原旱地苹果园硝酸盐严重累积问题得到普遍关注,陈翠霞^[10]发现新、老果区土壤 0~200 cm 土层硝态氮累积量分别达 $2\,724\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\,226\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,老果区土壤剖面硝态氮累积量显著高于新果区。路远等^[11]、Liu 等^[8]、范鹏等^[12]、马鹏毅等^[13]、Huang 等^[14]、冉伟等^[15]通过研究黄土高原不同树龄果园土壤剖面硝酸盐累积特征发现,土壤深层硝态氮累积现象明显,且随着果园树龄的增加土壤剖面硝酸盐累积问题趋于严重。Zhu 等^[16]发现黄土高原洛川县从谷类到苹果园的土地利用变化过程中 2017 年 0~2 m 和 0~6 m 土壤剖面硝态氮平均积累量分别为 $2\,635\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\,611\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

对黄土高原旱地苹果园氮素累积的研究虽多,但主要着重于乔化苹果园长期施肥下土壤剖面氮素累积问题,或将乔化和矮化果园一概而论。近几年来,黄土高原地区,特别是苹果产业发展较早的陕西地区,苹果品种正在经历更新换代,矮化苹果由于其收益快、管理方便等优点被大力推广并逐步替代乔化苹果。然而目前对于矮化苹果园土壤剖面氮素累积问题还关注较少,当季氮肥所导致的土壤氮素累积问题更是容易被其土壤本底的高氮情况所掩盖。因此,了解矮化苹果园氮素在土壤剖面高氮含量背景下的累积特征以及对当季氮肥所引起的土壤氮素累积问题进行定量研究,以避免加剧

黄土高原苹果园土壤硝酸盐深层累积问题迫在眉睫。本研究以黄土高原旱地矮化苹果园土壤为研究对象,利用剖面土钻取样法与 ^{15}N 示踪技术,分析矮化苹果园土壤剖面氮素累积淋溶特征以及当季氮肥对苹果园土壤氮残留及淋溶的影响,以期为解决黄土原旱地苹果园日益严重的土壤硝酸盐累积问题提供理论依据和思路。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2018 年 10 月—2019 年 10 月在西北农林科技大学洛川苹果试验站进行。试验站位于陕西省延安市洛川县凤栖镇芦白村($35^{\circ}48'\text{N}$, $109^{\circ}29'\text{E}$),属暖温带大陆性季风气候,平均海拔 1 072 m,多年平均降雨量 620 mm,主要分布在 7—9 月,年均气温 9.2°C ,日照时数 2 525 h,试验期间气温降雨量情况如图 1 所示。试验站土壤为黑垆土,质地为壤土。供试土壤基本理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

供试果树品种为‘晚熟矮化延长红’,定植于 2012 年,此果园由具有 20 多年种植历史的乔木老果园改造而来。小区试验开始于 2017 年,果树正处

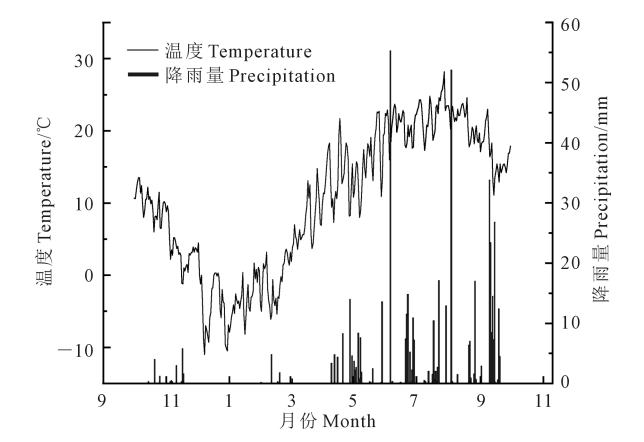


图 1 试验站 2018 年 10 月—2019 年 10 月日均气温及降雨量变化情况
Fig.1 Daily average temperature and rainfall changes from October 2018 to October 2019

于盛果期,植株密度为 $1\,250\text{棵}\cdot\text{hm}^{-2}$ (株行距 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$)。试验设置 3 个处理,分别为不施氮肥 CK(施氮量为 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、减氮施肥 N400(施氮量为 $400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、常规施肥 N800(施氮量为 $800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。每个处理包含 6~7 棵果树,设置 3 个重复小区,试验小区布置见图 2a。氮肥 10 月施基肥(60%)和翌年 7 月追肥(40%),磷肥全部于 10 月作为基肥施入,钾肥 10 月施 30%,次年 7 月追肥 70%。施肥方式为双沟条施,即在距树干约 50 cm 左右的两侧各挖一条宽 20 cm 和深 20 cm 的条状沟,施肥覆土。每个处理的每个小区分别设置 1 个微区,微区布置见图 2b,每个微区包含一棵果树,不设微区框。微区面积为 8 m^2 ,其施肥量与小区处理一致, ^{15}N -尿素(丰度:99%)与其他肥料施用量见表 2。试验期间果园不进行灌溉。

1.3 采样与测定

从 2018 年 10 月—2019 年 10 月,每隔 1 个月用土钻采集土壤样品。每个小区选取两棵果树,在两棵树的每条施肥沟内与施肥沟外(距树干 50、100、150 cm 处)分别选取 3 个采样点,每个小区共采集 12 个点。每个微区每条施肥沟附近(距树干 50、60、

70 cm 处)分别选取 3 个采样点,每个微区 6 个采样点。在每个采样点向下垂直方向 100 cm 以内土层每 20 cm 土层采集 1 份样品,100~300 cm 土层每 40 cm 采集 1 份样品,用 4℃ 冰箱保存并在一周内测定。小区土样施肥沟与施肥沟外土样混合均匀作为混合样测定,微区土样每条施肥沟附近的 3 个采样点土样混合均匀作为混合样测定。土壤水分采用烘干法测定,将采集的土样盛于铝盒中于烘箱 105℃ 下烘 8~12 h 至恒重;用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 浸提-流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮;土壤全氮采用浓 H_2SO_4 消煮,然后利用连续流动分析仪 AA3(Seal,德国)测定;使用元素分析仪+质谱(EA+MS)测定 $\text{TN}-^{15}\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^{-}-^{15}\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}-^{15}\text{N}$ 丰度。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the experimental soils					
土壤深度 Soil depth /cm	容重 Bulk density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有机质 Organic matter /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	矿质氮 Mineral nitrogen /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
0~20	1.267	8.58	0.84	9.67	8.35
20~60	1.547	7.26	0.76	240.25	8.40
60~100	1.312	4.73	0.47	115.54	8.45
100~140	1.443	4.18	0.34	173.72	8.27
140~200	1.384	3.48	0.29	92.64	8.32
200~300	1.384	3.09	0.25	84.44	8.30

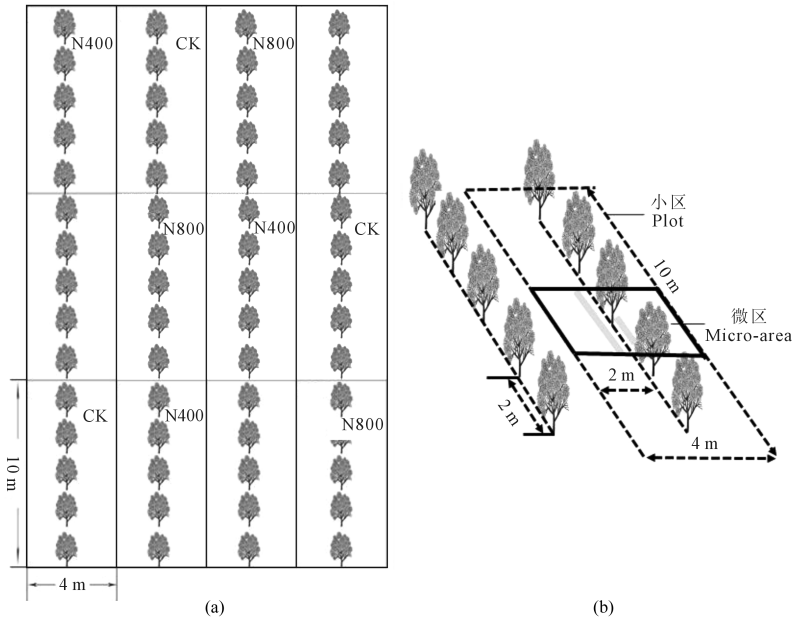


图 2 试验小区(a)及微区(b)布置图

Fig.2 Experimental plot (a) and micro-area (b) layout

在 2019 年 10 月苹果收获期,每个小区全部采收,称量果实质量,计算小区产量。

1.4 数据计算与处理

各土层中土壤氮累积量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=氮质量分数($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\times$ 土壤密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) $\times$ 土层厚度(cm) $\times 10$

表 2 微区施肥处理/g

Table 2 Fertilization treatment in micro-area				
处理 Treatment	N	^{15}N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	24	32
N800	19.6	50	24	32
N400	89.1	50	24	32

土壤各层全氮来自¹⁵N 尿素含量的比例:

$$Ndff(\%) = (A_s - A_n) / (A_f - A_n) \times 100\%$$

式中, A_s 表示土壤¹⁵N 的质量分数; A_n 表示¹⁵N 的自然质量分数(0.366%); A_f 表示混合后肥料¹⁵N 的质量分数。

¹⁵N 标记肥料残留量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = $Ndff \times$ 该土层土壤氮累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

¹⁵N 残留率(%) = [土壤剖面标记肥料氮残留总量(g)/标记肥料氮施用量(g)] $\times 100\%$

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26 软件进行

数据分析,采用 LSD 法进行差异显著性比较($P = 0.05$),采用 Origin 2019b 和 Surfer 13 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤无机氮含量与含水率时间动态分布特征

2018 年 11 月—2019 年 10 月果园不同施肥处理土壤无机氮浓度和含水率变化如图 3 和图 4 所示。

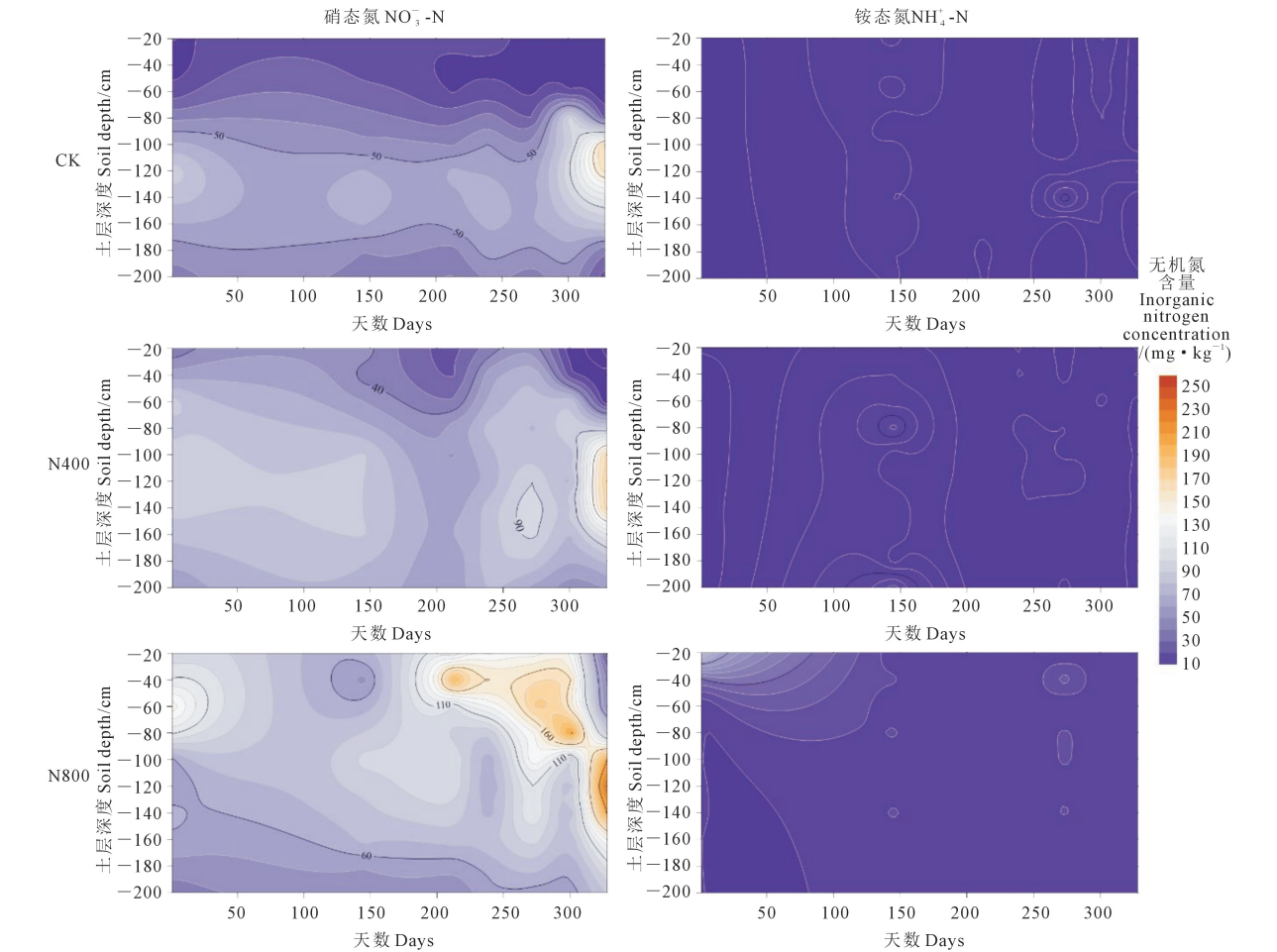


图 3 2018 年 11 月—2019 年 10 月矮化苹果园不同处理无机氮含量变化特征
Fig.3 Changes in inorganic nitrogen concentration of dwarf apple orchards under different fertilization treatments from November 2018 to October 2019

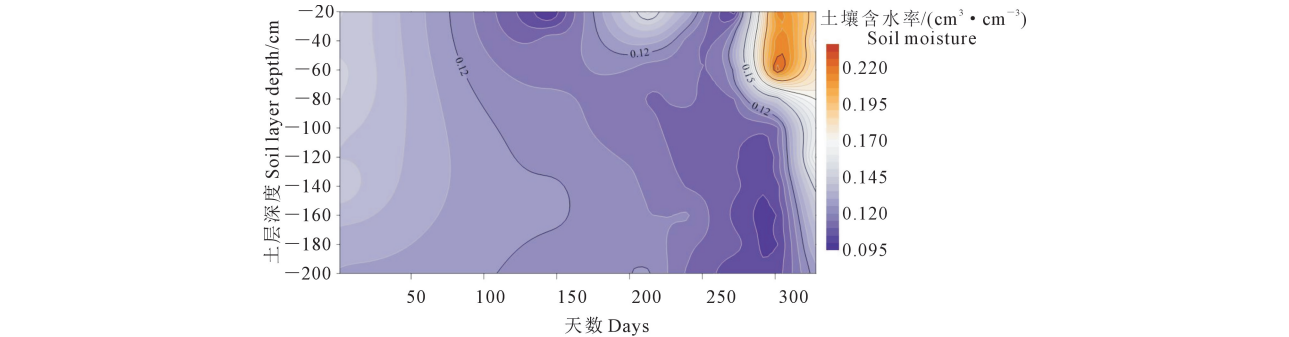


图 4 2018 年 11 月—2019 年 10 月矮化苹果园土壤含水率变化
Fig.4 Change in soil moisture content of dwarf apple orchards from November 2018 to October 2019

CK 处理土壤表层(0~20 cm)硝态氮含量较少,且变化不大,在 2018 年 11 月和 2019 年 10 月苹果收获期(328 d),土壤剖面硝态氮主要累积在 100~120 cm 土层,试验期间土壤深层(160~200 cm)硝态氮含量变化不大。N400 和 N800 处理表层土壤硝态氮含量较 CK 处理高,果实膨大期根系吸收导致根际土壤硝态氮含量有所降低,2019 年 6 月(193~224 d),果实膨大期根系吸收土壤氮加之突发暴雨补充地表水分,果树对氮的吸收利用率增加,根际土壤中硝态氮含量持续降低,至 7 月(224 d)追肥后土壤 0~80 cm 土层中硝态氮含量逐渐上升,7 月底至 10 月的持续降水导致土壤根区含水量大幅增加,硝态氮开始向下迁移,根区土壤硝态氮含量逐渐降低,至果实成熟期,硝态氮在 100~160 cm 土层大量累积。

CK 和 N400 铵态氮含量总体较低,这与试验区土壤的性质与质地紧密相关。N800 处理根际土壤铵态氮含量在 2018 年 11 月—2019 年 4 月(1~150 d)不断降低。

2.2 土壤剖面氮含量与累积分布特征

在果实成熟期,果园 0~300 cm 土壤剖面全氮、硝态氮和铵态氮含量与累积量如图 5 和图 6 所示。由图 5 可见,各土层全氮含量为 0.17~0.58 g·kg⁻¹,硝态氮含量为 0.1~211.1 mg·kg⁻¹,铵态氮含量为 0.0~1.1 mg·kg⁻¹,在 0~300 cm 土壤剖面中,N800 和 CK 处理全氮含量随着土壤深度的增加呈现逐渐降低趋势,N400 呈先降低后基本保持不变的趋势。各处理土壤硝态氮含量随土壤深度增加呈先增加后逐渐降低趋势,在 80~140 cm 土层范围内达到峰值,在该土层存在硝态氮的富集,说明土壤中硝态

氮存在向下淋洗出根层(0~80 cm)的现象。果园土壤铵态氮含量总体较低,主要与试验区土壤质地、性质等有关,而 CK 在 120 cm 处铵态氮含量较高且高于 N400 和 N800 可能是与铵态氮的淋溶和硝化作用有关。土壤硝态氮含量始终高于土壤铵态氮含量,说明在黄土高原地区硝态氮是无机氮的主要存在形式。

由图 6 可见,CK、N400 与 N800 处理中 0~300 cm 土壤剖面中全氮累积量分别为 10 927.3、13 734.8 kg·hm⁻²与 15 645.4 kg·hm⁻²,硝态氮累积量分别为 1 873.5、2 353.9 kg·hm⁻²与 2 892.7 kg·hm⁻²,铵态氮累积量分别为 12.2、42.6 kg·hm⁻²与 44.4 kg·hm⁻²。N800 处理全氮累积量显著高于 N400 和 CK 处理,N400 与 CK 处理间也存在显著性差异,表明施氮量会显著影响土壤氮累积量。3 个处理土壤硝态氮累积量差异不显著,CK、N400 与 N800 处理 100~200 cm 土层的硝态氮累积量分别为 1 151.3、1 563.2 kg·hm⁻²与 1 682.0 kg·hm⁻²,远高于 0~100 cm 和 200~300 cm 土层,表明苹果园土壤在该土层存在硝态氮累积现象。

2.3 土壤全氮 Ndff 值

在果实成熟期,肥料残留的全氮 Ndff 值总趋势如图 7 所示。N400 处理的 Ndff 值在 80~100 cm 土层达到最大值 1.50%,且与其他各土层存在显著性差异。在 N800 处理中,80~100 cm 与 100~140 cm 土层 Ndff 值达到峰值,分别为 2.03%与 1.68%,显著高于 20~40、140~180、180~220、220~260、260~300 cm 土层,但与 0~20、40~60、60~80 cm 土层之间无显著性差异,说明肥料氮主要富集于 0~140 cm 土层,大部分在 80~140 cm 土层中。

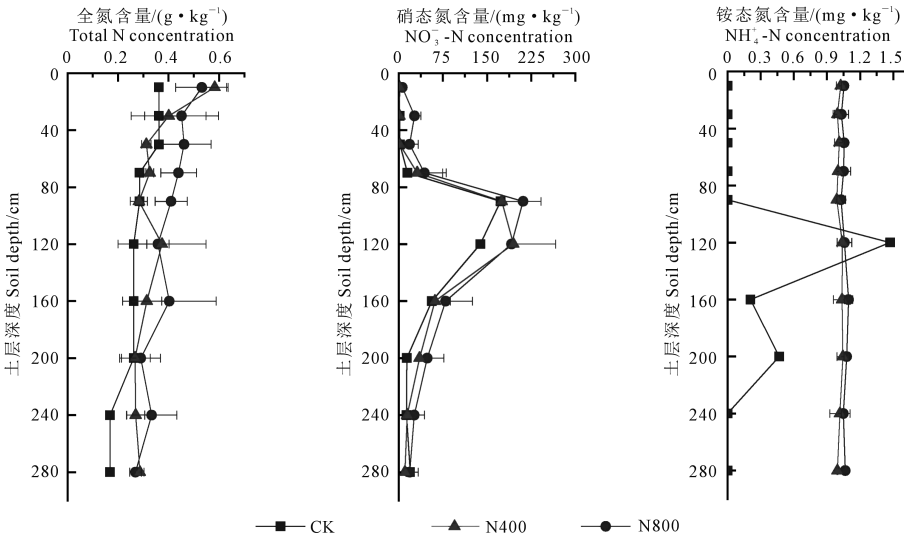
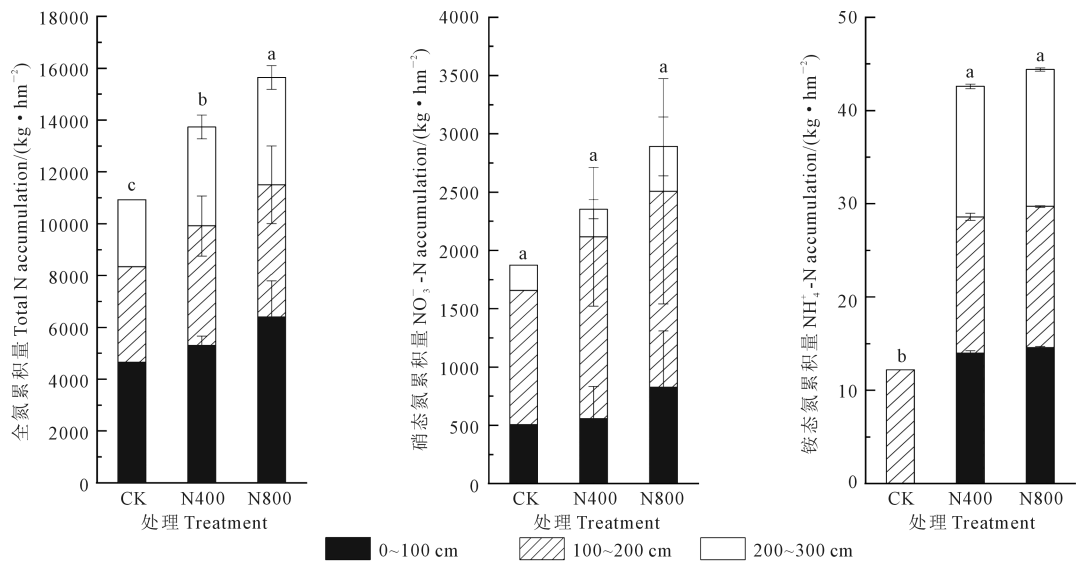


图 5 苹果园果实成熟期土壤剖面氮含量分布

Fig.5 Distribution of nitrogen content in soil profile at mature stage of apple orchard



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note:The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 6 苹果园果实成熟期土壤剖面各土层氮累积量

Fig.6 Nitrogen accumulation of each soil layer in apple orchard at fruit ripening stage

总体来看,N800 处理的 N_{dff} 均值(7.06%) 高于 N400 处理(3.27%),说明施肥量对土壤 N_{dff} 值有显著影响。此外,各处理 0~300 cm 土层都检测到 TN^{-15}N 信号,表明当季氮肥已迁移至 0~300 cm 土壤深度范围,矮化苹果园在 0~300 cm 土壤剖面氮素淋洗现象明显。

2.4 土壤当季肥料氮残留

苹果园果实成熟期当季肥料氮残留情况见图 8 和表 3。由图 8 可知,各土层 TN^{-15}N 的残留量随着土层深度的增加呈现先增加后降低趋势且在 120 cm 土层处达到峰值,N400 与 N800 处理在该层的残留量分别为 $20.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $71.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均显著高于其他各土层全氮残留量。N800 处理全氮残留量高于 N400 处理,在 0~180 cm 土层表现尤为显著,说明施氮量对土层氮残留量存在显著影响。各土层 $\text{NO}_3^{-15}\text{N}$ 的残留量随土层深度变化的趋势与 TN^{-15}N 基本保持一致,在 120 cm 土层处达到峰值,N400 处理残留量为 $19.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 90 cm 土层处无显著性差异,显著高于其他土层;N800 处理残留量为 $58.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于其他各土层,说明硝态氮在 100~140 cm 土层存在累积。各土层 $\text{NH}_4^{+15}\text{N}$ 残留量总体较低,主要归因于试验区土壤质地与性质。

由表 3 可知,在苹果成熟期,N400 处理 0~300 cm 土壤剖面的 TN^{-15}N 、 $\text{NO}_3^{-15}\text{N}$ 和 $\text{NH}_4^{+15}\text{N}$ 残留量分别为 4.96、4.42 g 和 0.048 g,残留率分别为

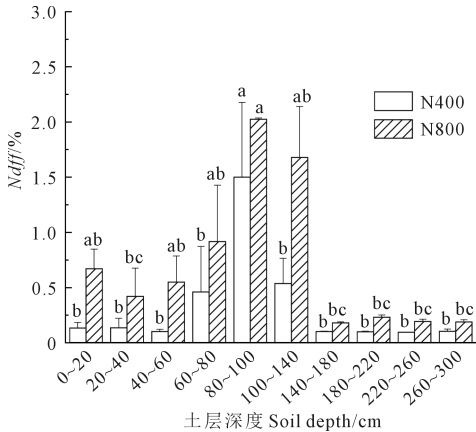


图 7 苹果园果实成熟期土壤 ^{15}TN - N_{dff} 值
Fig.7 ^{15}TN - N_{dff} value of soil in apple orchard at fruit ripening stage

21.7%、19.2% 和 0.2%; N800 处理残留量分别为 11.22、9.04 g 和 0.071 g,残留率分别为 48.8%、39.3%和 0.3%,说明当季氮肥残留主要以硝态氮的形式存在于土壤中。N400 处理 0~100 cm 和 100~300 cm 土层 ^{15}N 残留总量分别为 2.67 g 和 2.29 g,其中 $\text{NO}_3^{-15}\text{N}$ 残留量分别为 2.45 g 和 1.97 g;N800 处理 0~100 cm 和 100~300 cm 土层 ^{15}N 残留总量分别为 4.35 g 和 6.87 g,其中 $\text{NO}_3^{-15}\text{N}$ 残留量分别为 3.30 g 和 5.74 g,这表明当季氮肥导致的硝态氮深层残留占很大比重(8.5%~25.0%),同时增加氮的施入显著加剧了土壤氮素深层残留问题,这也说明黄土高原苹果园氮素在土壤剖面的淋溶问题不容忽视。

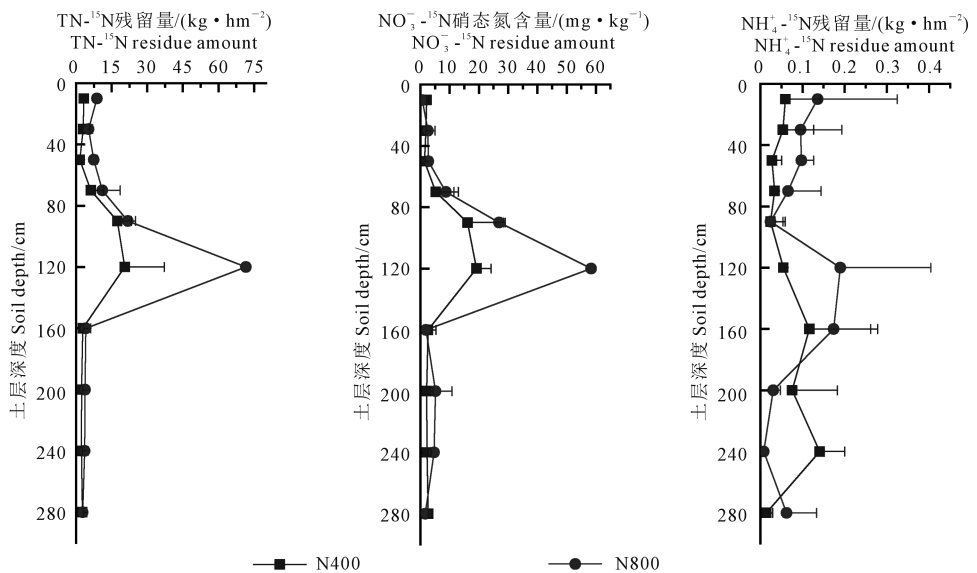


图 8 苹果园果实成熟期土壤¹⁵N 残留量

Fig.8 Soil ¹⁵N residue amount in apple orchard at fruit ripening stage

表 3 苹果园果实成熟期当季肥料氮残留情况

Table 3 Nitrogen residue of apple orchard at fruit ripening period

土层深度 Soil depth /cm	TN- ¹⁵ N 残留量/g(残留率/%) TN- ¹⁵ N residue amount/g (residue rate/%)		NO ₃ ⁻ - ¹⁵ N 残留量/g(残留率/%) NO ₃ ⁻ - ¹⁵ N residue amount/g (residue rate/%)		NH ₄ ⁺ - ¹⁵ N 残留量/g(残留率/%) NH ₄ ⁺ - ¹⁵ N residue amount/g (residue rate/%)	
	N400	N800	N400	N800	N400	N800
0~100	2.67(11.7)	4.35(18.9)	2.45(10.7)	3.30(14.3)	0.016(0.1)	0.034(0.1)
100~300	2.29(10.0)	6.87(29.9)	1.97(8.5)	5.74(25.0)	0.032(0.1)	0.037(0.2)
0~300	4.96(21.7)	11.22(48.8)	4.42(19.2)	9.04(39.3)	0.048(0.2)	0.071(0.3)

2.5 不同施肥量对苹果产量的影响

由表 4 可见,N400 处理平均单果重高于其他两个处理,但 3 个处理间差异不显著。N400 和 N800 处理单株产量显著高于 CK 处理,N400 与 N800 处理间差异不显著。N400 处理和 N800 处理苹果产量显著高于 CK 处理,N400 与 N800 处理间差异不显著,与 CK 处理相比,N400 处理增产了 14.9%,N800 处理增产了 13.5%。

表 4 不同施肥量对苹果产量的影响

Table 4 Effect of different fertilizer application rates on apple yield

处理 Treatment	平均单果重 Average single fruit weight/g	平均单株产量 Average yield per plant/kg	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
CK	221.76a	17.19b	21491.89b
N400	226.38a	31.25a	39057.66a
N800	215.04a	30.14a	37679.78a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:The different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

3 讨 论

3.1 不同施氮处理下土壤氮含量变化

在果实成熟期,土壤全氮含量随着深度的增加呈现出逐渐降低的趋势,果园土壤 40~60 cm 及以上土层全氮含量较高,而深层土壤全氮含量较低(图 5),主要与施肥深度有关,果树枯枝落叶归还土壤参与氮素循环,也增加了浅层土壤全氮含量,这与范鹏等^[17]的研究结果一致。

本研究中 2018 年苹果收获施基肥后和 2019 年 7 月追肥后,根际土壤中硝态氮含量短暂升高后逐渐降低,主要原因在于土壤水分变化和生长季苹果

树对土壤无机氮吸收。硝态氮的运移与土壤水分密切相关,灌水或降雨会造成土壤水分的剧烈变化,水分是氮素流失的载体,当灌水量或降雨增加时,氮素向深层淋溶的风险明显增高,最终土壤氮素会脱离植株根系在下层累积^[18-20]。郭胜利等^[21]研究发现,硝态氮深层积累一般出现在年降水量变化于 400~800 mm 之间的雨养农业区,自然降水条件下,硝态氮积累土层一般为 0~200 cm,其峰值出现的深度一般在 150 cm 左右。黄土高原年均降雨

量小,但是相对集中,由于试验期间年降雨量为496.8 mm,7、8月降雨密度较大,而矮化苹果树根系主要分布在0~80 cm土层,强降水造成的地表含水量增加使硝态氮淋洗出根际范围,导致了0~80 cm土层硝态氮含量降低,在80~140 cm土层大量累积(图3、4、5、6),这与郭胜利等^[21]的研究结果相符,土壤硝态氮含量与含水率时空变化也表现出较强的一致性。此外,果树吸收氮对土壤硝态氮的影响则表现在苹果树对氮的吸收主要是在收获后和膨果期^[22]。苹果收获后,果树根系需要从土壤中吸收大量氮进行储备,为翌年果树萌芽、枝叶、根系以及果实的优质生长做好准备;在果实膨大期(6—9月),果树需吸收氮以维持各器官的正常功能及果实发育。此外,充足的水分供应是充分利用土壤氮的关键,反之亦然。试验前本研究小区20~60 cm土层矿质氮含量高达240.25 mg·kg⁻¹,远高于其他黄土高原硝态氮累积研究结果^[8,16],根区矿质氮可能已经满足果树生长发育需求,但是由于黄土高原的降水特点和苹果园的蒸散发等对土壤水分的影响,果树对土壤氮的吸收利用受到限制,根区无机氮不能被有效利用,增加了硝态氮淋溶风险。

本研究中果园不同施肥量处理土壤硝态氮均有向深层淋溶现象。随着施肥量的增加,各土层硝态氮的含量均有不同程度的增加。于昕阳等^[23]对旱地冬小麦的研究发现0~200 cm土层硝态氮累积量随着氮肥用量的提升呈现显著增加趋势,而且氮肥用量越高土壤硝态氮累积量增加的幅度越大。对于不施用氮肥的处理也具有明显的硝态氮淋溶累积现象,这主要是由于本研究所在矮化苹果园是由有着20 a历史的乔化老果园改造而来,且小区试验前已经进入盛果期(施肥量达800 kg·hm⁻²),往年果园大量施氮造成土壤剖面硝态氮严重累积,即使不施氮肥,也将在土壤剖面长期持续淋溶。Zhou等^[24]也表明硝态氮从玉米根区淋失,即使不施氮肥,也会增加深层土壤的硝态氮含量。

本研究中土壤铵态氮含量低,主要原因在于供试土壤硝化作用强烈,且该地区土壤质地为壤土,粘粒含量少,对铵根离子的表面吸附作用较弱^[1]。铵态氮在100~140 cm土层含量比其他土层高(图5),一方面是因为铵态氮的淋溶导致,虽然铵态氮吸附性很强,一般都分布在土壤根层范围,但由于土壤粘粒较少,也可随着降雨入渗往下淋溶;另一方面CK由于没有外源肥料氮素输入,土壤根层中仅存的铵态氮进一步转化成硝态氮,造成土壤根层含量比N800和N400低,从而在100~140 cm地方

显现出突变现象。2018年10月施基肥后,大量氮肥施入和枯枝落叶归还土壤补充了土壤氮库,表层土壤铵态氮含量随之提高,但由于土壤呈碱性,铵态氮易挥发进入大气,加之入春后温度逐渐升高,硝化作用逐渐剧烈,根际土壤中铵态氮含量逐渐降低(图3)。

3.2 不同施氮处理下当季氮肥在土壤各土层的残留量

果树吸收的氮素主要来自土壤氮素和肥料氮两个方面,并且果树生产在很大程度上依赖于土壤氮素^[25-27],因此,当季氮肥在土壤中的残留是不可避免的,它是扩充土壤氮库和参与氮循环的主要途径。另有研究表明,残留在土壤中的肥料氮素作为土壤氮库的补充在后期仍可被植株吸收利用^[28]。土壤中肥料氮残留量往往随施氮量的增加而增加,但这部分氮素并非要完全能被后续利用,而只有通过调控施肥量将其控制在合理的范围之内,以最大程度减少其损失才能发挥持续的后续效用。本研究中,在常规施氮N800和减氮施肥N400处理中,0~300 cm土壤剖面¹⁵N残留总量分别为48.8%与21.7%,施肥量越大,当季氮肥的残留率越高。王芬等^[29]对富士苹果土壤肥料氮残留研究表明,施氮量越大残留量越多,但残留率越小,本研究中施氮量越大,残留量越多,残留率也越大,与其实验结果的差异主要归因于土壤性质、施肥量、植被根系特点、采样深度及试验期间降水量等差异,本研究施肥量采用当地常规施肥模式,远远高于苹果树氮素吸收量^[30],因而呈现残留量与残留率均随施氮量增加而增加的趋势。本研究中,NO₃⁻-¹⁵N在各土层(0~300 cm)均有分布,硝态氮是肥料氮在土壤中残留的主要存在形式,N800与N400处理的残留率分别为39.3%与19.2%。因此,该旱地矮化果园在当地常规施肥情况下其硝态氮残留量是相对巨大的,而适当减少施氮量,可有效降低土壤硝态氮的残留。

值得注意的是,常规施氮N800处理下0~100 cm和100~300 cm土层¹⁵N残留率分别为18.9%和29.9%,减氮施肥N400处理下残留率分别为11.7%和10.0%,该旱地苹果园大量施肥造成土壤剖面氮素淋溶现象显著,很大部分当季氮肥被淋出根区,造成深层氮素累积;同时,减氮可有效降低土壤深层氮素残留。此外,本研究中当季氮肥主要残留在80~140 cm土层(图8),这与施肥深度和降水有关。夏梦洁等^[31]利用¹⁵N标记法研究小麦收获后残留肥料在土壤中的分布,发现标记肥料氮向下迁移的深度达80 cm土层,主要集中在40~60 cm土层。王

芬等^[32]在富士苹果果实膨大期土壤运用¹⁵N 同位素示踪技术进行研究,发现 0~60 cm 土层¹⁵N 丰度随着土壤深度的增加逐渐减小,且各土层内¹⁵N 丰度均随氮肥水平提高而增加。彭玲等^[33]研究嘎啦苹果发现不同施氮方式下¹⁵N 残留主要分布在 0~120 cm 土层且呈先增加后减小趋势,土壤残留率为 22.06%~24.92%。王前登等^[34]研究库尔勒香梨对¹⁵N 肥料的利用、转移规律,结果表明,0~120 cm 土壤剖面中 NO_3^- -¹⁵N 残留量随着土层深度的增加逐渐减少,0~60 cm 土层残留量显著高于 60~120 cm 土层。本研究中,在 0~300 cm 土壤剖面中均有¹⁵N 残留,且随着施氮量的增加¹⁵N 丰度也有所提高且在 80~140 cm 达到峰值,与其他研究的差异主要与试验地点、植被根系特点、采样深度及试验期间降水等因素有关。矮化苹果根系一般不超过 80 cm,因此对根际区域氮素吸收较多,肥料氮素残留较少。同时,本研究试验地由 20 a 种植历史的老苹果园改造而来,老果树根系腐烂导致大孔隙流,而造成当季氮肥淋溶到更深的土层,同时试验期间有两场暴雨(>50 mm)出现,也增加了氮素向深层淋溶的风险。由此可见,该旱地苹果园当季氮肥残留量较大,而由于该地区降雨与矮化苹果根系特点,加之老果园果树根系腐烂形成的大孔隙造成当季肥料氮在土壤剖面淋溶严重。而硝态氮的累积和淋溶不仅使得氮肥大量损失,还会造成土壤和地下水污染^[19]。因此,有必要对黄土高原旱地矮化苹果园进行氮肥管理,后续研究应根据果树吸氮量确定最佳施肥量,既能保持目标产量,又能将对环境的危害最小化。

3.3 不同施氮量对苹果产量与土壤环境的影响

本研究中,减氮施肥 N400 的氮肥施用量比常规施肥 N800 减少一半,但两者产量差异不显著(表 4),这与彭福田等^[35]和杨莉莉等^[36]的研究结果一致。一方面,本研究小区土壤无机氮含量较高,可能已经满足果树生长发育需求,但是由于黄土高原的降水和苹果园的蒸散发等特点限制了果树对土壤氮素的吸收利用。此外,过量施氮也会导致果树营养生长过剩,生殖生长受到抑制,同时造成养分吸收不平衡,从而影响树体生长和产量形成^[36-37]。施氮量对于苹果产量的影响需要更为长期的研究,本研究为期一年,产量差异并不能避免其偶然性。

氮肥施入土壤后一方面通过根系被果树吸收以满足其生长发育;另一方面在土壤中以无机氮形态或有机结合态残留;其他则通过氨挥发、硝化、反

硝化、淋溶等途径损失至环境中^[38]。朱志军等^[39]对本研究小区苹果园 N_2O 排放通量和氨挥发进行田间监测,结果表明,与常规施肥处理相比,优化减氮处理 N_2O 排放总量降低了 43.3%,常规高氮与优化减氮处理年排放系数分别为 0.27%、0.22%。在苹果园集中条状施肥的方式下,深施(>20 cm)的氮素几乎不通过 NH_3 挥发途径损失^[40]。冯涛^[30]对本研究小区苹果树对氮肥的吸收进行研究,结果表明,不施氮肥、常规高氮和优化减氮 3 个处理,整个树体年氮素吸收量分别为 100.91、106.77、98.73 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处理间差异不显著。根据以上同一试验地他人研究结果并结合本研究数据发现,减氮施肥处理能保持果树吸氮量,能显著降低土壤中氮素残留,但其所造成的硝酸盐淋溶问题亦不容忽视,表明该研究中设置的减氮施肥的施氮量(400 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可能还是超出了最佳施氮量。旱地矮化苹果园肥料氮的累积与淋溶研究需要一个长期的过程,而且由于降雨和施肥的差异,其残留量以及残留的¹⁵N 肥料对果树树体次年生长的有效性有待长期定位研究,因此该矮化苹果园的最佳施肥量问题仍需进一步研究确定。

4 结 论

在旱地矮化果园,土壤剖面中氮素累积以硝态氮为主,硝态氮含量与含水率动态变化表现出较强的一致性。在苹果成熟期,不施氮肥 CK、减氮施肥 N400 与常规施氮 N800 处理硝态氮在 80~140 cm 土层存在明显富集现象,其含量峰值分别为 174.9、194.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 211.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当季氮肥在 0~300 cm 的土壤各土层均有残留,但主要集中于 0~140 cm 的土层范围内,常规施氮 N800 相对减量施氮 N400 而言会增加当季氮肥在土壤各层的残留。根际以下 100~300 cm 土层中存在当季氮肥淋溶导致的硝态氮大量累积现象,常规施氮 N800 会加剧当季氮肥向土壤深层淋溶,减氮施肥 N400 处理的深层累积仍不容忽视。综合考虑土壤剖面氮的累积、当季氮肥的残留、果树吸收及产量等因素,最佳施肥量及施肥量对苹果产量的影响在减量施氮 N400 的基础上仍有待进一步研究确定。

参 考 文 献:

- [1] 屈红超.黄土高原苹果园硝酸盐累积特征与淋溶过程模拟[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
QU H C. Nitrate accumulation characteristics and leaching process simulation in apple orchard of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest

- A&F University, 2019.
- [2] 王爱.黄土高原苹果树识别与蒸散发过程模拟[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- WANG A. Apple tree identification and evapotranspiration process simulation on the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [3] 牛永浩,花蕾. 渭北无公害优质苹果生产关键技术研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 145-148.
- NIU Y H, HUA L. Key techniques for the production of high quality pollution-free apples in Weibei area[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34(10): 145-148.
- [4] 彭福田,姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 361-367.
- PENG F T, JIANG Y M. Characteristics of N, P, and K nutrition in different yield level apple orchards [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2): 361-367.
- [5] 赵帅翔,张卫峰,姜远茂,等. 黄土高原苹果过量施氮因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 484-491.
- ZHAO S X, ZHANG W F, JIANG Y M, et al. Factors leading to excessive nitrogen fertilization on apple in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 484-491.
- [6] 张贵龙.蔬菜保护地氮素利用与去向研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
- ZHANG G L. Research on utilization and fate of nitrogen in vegetable protected soils [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [7] 樊军,邵明安,郝明德,等. 渭北旱塬苹果园土壤深层干燥化与硝酸盐累积[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1213-1216.
- FAN J, SHAO M A, HAO M D, et al. Desiccation and nitrate accumulation of apple orchard soil on the Weibei dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1213-1216.
- [8] LIU Z J, MA P Y, ZHAI B N, et al. Soil moisture decline and residual nitrate accumulation after converting cropland to apple orchard in a semiarid region: evidence from the Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 181: 104080.
- [9] 樊军,胡波. 黄土高原果业发展对区域环境的影响与对策[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 355-359.
- FAN J, HU B. Effects of apple orchard development on ecological environment in the Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(11): 355-359.
- [10] 陈翠霞.黄土高原新老苹果产区果园养分投入和土壤养分累积特征研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- CHEN C X. Characteristics of nutrient input and soil nutrient accumulation in new and old apple orchards of the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [11] 路远,党廷辉,成琦. 黄土高原沟壑区苹果园土壤剖面水分及矿质氮分布特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 106-112, 121.
- LU Y, DANG T H, CHENG Q. Distribution characteristics of soil moisture and mineral nitrogen in soil profile of apple orchard in gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 106-112, 121.
- [12] 范鹏,李军,张丽娜,等. 黄土高原苹果园地深层土壤氮素含量与分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 420-429.
- FAN P, LI J, ZHANG L N, et al. Soil nitrogen contents and deep profile distributions in apple orchards of the Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 420-429.
- [13] 马鹏毅,赵家锐,何威明,等. 黄土高原不同树龄苹果园土壤水分及硝态氮剖面特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 192-198, 214.
- MA P Y, ZHAO J R, HE W M, et al. Evaluating the vertical distributions of soil moisture and nitrate in apple orchards with different ages in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 192-198, 214.
- [14] HUANG Y N, CHANG Q R, LI Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 628/629: 443-452.
- [15] 冉伟,谢永生,郝明德. 渭北旱塬苹果园土壤矿质氮累积与分布研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 157-160.
- RAN W, XIE Y S, HAO M D. Mineral N accumulation and distribution of apple orchard soil on the Weibei dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 157-160.
- [16] ZHU X Q, FU W H, KONG X J, et al. Nitrate accumulation in the soil profile is the main fate of surplus nitrogen after land-use change from cereal cultivation to apple orchards on the Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 319: 107574.
- [17] 范鹏,李军,张丽娜,等. 黄土高原苹果园地深层土壤氮素含量与分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 420-429.
- FAN P, LI J, ZHANG L N, et al. Soil nitrogen contents and deep profile distributions in apple orchards of the Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 420-429.
- [18] 闫建文.盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- YAN J W. Study on the Water and nitrogen migration regularity and efficient utilization of maize in the salinity soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [19] 尹洪涛.不同降雨量对夏玉米土壤氮素迁移转化影响研究[D].泰安:山东农业大学,2013.
- YIN H T. Modification of nitrogen movement and transformation of summer maize and soil under different rainfall patterns [D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2013.
- [20] 郭胜利,党廷辉,郝明德. 黄土高原沟壑区沟坡地土壤剖面中矿质氮的分布特征[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 31-33, 66.
- GUO S L, DANG T H, HAO M D. Mineral N distribution in soil profiles of slope land in gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 31-33, 66.
- [21] 郭胜利,张文菊,党廷辉,等. 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[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 584-591.
- GUO S L, ZHANG W J, DANG T H, et al. Accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 584-591.
- [22] 樊红柱.苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.
- FAN H Z. Growth, development, nutrient uptake, utilization and accumulation of apple trees [D]. Yangling: Northwest A&F

- University, 2006.
- [23] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 320-324.
- YU X Y, ZHAI B N, JIN Z Y, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiency and soil fertility in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 320-324.
- [24] ZHOU S L, WU Y C, WANG Z M, et al. The nitrate leached below maize root zone is available for deep-rooted wheat in winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(3): 723-730.
- [25] STANFORD G, LEGG J O, SMITH S J. Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen mineralization potentials of soils and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plants[J]. Plant and Soil, 1973, 39(1): 113-124.
- [26] REDDY K R, PATRICK W H. Uptake of fertilizer nitrogen and soil nitrogen by rice using ^{15}N -labelled nitrogen fertilizer[J]. Plant and Soil, 1980, 57(2): 375-381.
- [27] SHABAEV V P. The effect of cropping and fertiliser nitrogen rates on nitrogen balance in soil[J]. Plant and Soil, 1986, 91(2): 249-256.
- [28] 王西娜,王朝辉,李华,等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1202-1212.
- WANG X N, WANG C H, LI H, et al. Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1202-1212.
- [29] 王芬,田歌,刘晶晶,等. 富士苹果萌芽至新梢旺长期肥料氮去向和土壤氮库盈亏[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 931-937.
- WANG F, TIAN G, LIU J J, et al. Fate of fertilizer nitrogen and soil nitrogen pool budget of Fuji apple from germination stage to new shoot growing stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 931-937.
- [30] 冯涛.渭北旱塬苹果园不同肥料对氮素的吸收、 N_2O 排放及果实品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- FENG T. Effects of different fertilizers on nitrogen uptake, N_2O emission and fruit quality of apple orchards in Weibei arid plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [31] 夏梦洁,陈竹君,刘占军,等. 黄土高原旱地夏季休闲期 ^{15}N 标记硝态氮的去向[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1230-1239.
- XIA M J, CHEN Z J, LIU Z J, et al. Fate of ^{15}N labeled nitrate in dryland under summer fallow on the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1230-1239.
- [32] 王芬,田歌,彭玲,等. 富士苹果营养转换期肥料氮去向和土壤氮库盈亏研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 254-258.
- WANG F, TIAN G, PENG L, et al. Study on fertilizer nitrogen fate and soil nitrogen pool budget during nutrition transformation period of Fuji apple[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 254-258.
- [33] 彭玲,李慧峰,崔倩,等. 不同施氮方式对嘎啦苹果碳氮利用和产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 249-254, 261.
- PENG L, LI H F, CUI Q, et al. Effects of different nitrogen application methods on carbon and nitrogen utilization, yield and quality in galaapple tree[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 249-254, 261.
- [34] 王前登,何雪菲,丁邦新,等. 基于 ^{15}N 示踪的库尔勒香梨园土壤无机氮残留分布特征[J]. 经济林研究, 2019, 37(1): 181-186.
- WANG Q D, HE X F, DING B X, et al. Distribution characteristics of soil inorganic nitrogen residues in Korla Fragrant Pear orchard based on ^{15}N tracing[J]. Non-wood Forest Research, 2019, 37(1): 181-186.
- [35] 彭福田,姜远茂,顾曼如,等. 不同负荷水平下氮素对苹果果实生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 690-694.
- PENG F T, JIANG Y M, GU M R, et al. Effect of nitrogen on apple fruit development in different load[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 690-694.
- [36] 杨莉莉,王永合,韩稳社,等. 氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 631-639.
- YANG L L, WANG Y H, HAN W S, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer and applying organic fertilizer on apple yield and quality and soil biological characteristics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(3): 631-639.
- [37] 魏斌,李友明,翟广生,等. 氮素营养对猕猴桃营养功能特征及果实产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 98-101.
- WEI B, LI Y M, ZHAI G S, et al. Effects of nitrogenous nutrition on nutritional functional traits and fruit yield of *actinidia lindl* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 98-101.
- [38] 彭福田,姜远茂,顾曼如,等. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 208-213.
- PENG F T, JIANG Y M, GU M R, et al. Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2003, 9(2): 208-213.
- [39] 朱志军,杨莉莉,冯涛,等. 渭北旱塬苹果园不同施肥处理 N_2O 排放特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 59-65.
- ZHU Z J, YANG L L, FENG T, et al. Characteristics of N_2O emissions from different fertilization treatments in Weibei dryland apple orchard[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 59-65.
- [40] 朱志军.渭北苹果园施肥制度对氨挥发和温室气体排放的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- ZHU Z J. Effect of fertilization system on ammonia volatilization and greenhouse gas emission in Weibei apple orchard [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.