

DOI: 10.5846/stxb202207081952

牛虎虎, 赵西宁, 高晓东, 杨孟豪, 赵连豪, 李昌见, 王绍飞. 苹果园改种粮食作物渭北旱塬深层土壤水氮变化特征. 生态学报, 2023, 43(14): 5926-5936.

Niu H H, Zhao X N, Gao X D, Yang M H, Zhao L H, Li C J, Wang S F. Variation characteristics of the deep soil water and nitrogen in orchards in Weibei dry plateau after replanting food crops. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5926-5936.

苹果园改种粮食作物渭北旱塬深层土壤水氮变化特征

牛虎虎^{1,2}, 赵西宁^{1,3,*}, 高晓东^{1,3}, 杨孟豪³, 赵连豪³, 李昌见³, 王绍飞^{1,2}

¹ 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100

² 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

³ 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:黄土高原退耕还林(草)工程实施 20 年来, 长期苹果种植导致了普遍的土壤干层和大量的硝态氮累积, 严重制约了农业和区域经济社会可持续发展。因此, 明确不同树龄苹果园改种粮食作物后对深层土壤干层恢复(土壤水分变化)、土壤硝态氮累积与运移的影响, 对于黄土高原土壤质量改善和农业可持续发展具有重要意义。以渭北旱塬为研究区, 选取 10、15、20、30 a 树龄的苹果园以及对应树龄苹果园改种为 2、5 a 和 6 a 粮食作物为研究对象, 通过对比分析各样地 0—10 m 剖面的土壤含水量、土壤储水量和硝态氮含量的差异, 基于空间换时间的方法定量评估苹果园改种为粮食作物后对于深层土壤水氮的影响。结果表明: (1) 不同林龄苹果园改种粮食作物后土壤水分迅速恢复, 在 2 年之内均可恢复到 7.0 m 左右深度。(2) 改种后土壤储水量对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响最显著, 不同林龄苹果园改种粮食作物后, 土壤剖面中硝态氮随着土壤水分的恢复发生了不同程度的淋失。改种前苹果园种植年限对于改种后土壤硝态氮累积量起决定性作用, 改种前林龄越长, 改种后硝态氮累积量越大、淋失深度越浅。(3) 土壤累积硝态氮的淋失滞后于土壤水分的向下运动。可见, 不同林龄苹果园改种粮食作物后土壤水分均迅速恢复, 加速了硝态氮的淋失, 然而土壤水分与硝态氮的向下运动并不一致。在进行改种时需要综合考虑土壤水分恢复的同时硝态氮迅速淋失造成土壤质量下降的问题。研究对合理优化土地利用结构以及改善土壤质量等具有深远的意义。

关键词:渭北旱塬; 土地利用变化; 土壤水分; 土壤硝态氮

Variation characteristics of the deep soil water and nitrogen in Weibei dry plateau after replanting food crops

NIU Huhu^{1,2}, ZHAO Xining^{1,3,*}, GAO Xiaodong^{1,3}, YANG Menghao³, ZHAO Lianhao³, LI Changjian³, WANG Shaofei^{1,2}

¹ Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

² College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

³ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Since the implementation of the Loess Plateau Returning Forestry (Grass) Project in late 1990s, long-term apple planting has led to the universal soil dry layer and a large amount of nitrate nitrogen accumulation, which has seriously restricted the sustainable development of agricultural and regional economy. Therefore, clarifying the effects of apple orchards of different ages converted to food crops on the recovery of deep soil dry layer (soil moisture change), soil nitrate nitrogen accumulation and transport is crucial to the improvement of soil quality and sustainable agricultural development on

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目(42125705); 唐仲英基金会项目

收稿日期:2022-07-08; **网络出版日期:**2023-03-23

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

the Loess Plateau. Weibei dry plateau was used as the study area, and apple orchards of 10, 15, 20 and 30 years old and apple orchards of the same age converted to food crops of 2, 5 and 6 years old were selected for the study. A comparative analysis of the differences in soil water content, soil water storage and nitrate-N content between 0—10 m profiles of each site was used to quantitatively assess the effect of conversion of apple orchards to food crops on deep soil water and N based on a space-for-time approach. The results showed that (1) soil moisture recovered rapidly after conversion to food crops from apple orchards of different stand ages, reaching a depth of around 7.0 m within 2 years. (2) The direct effect of soil water storage after conversion on the accumulation of soil nitrate after conversion was the most important. The conversion of apple orchards of different ages to food crops resulted in varying degrees of nitrate-nitrogen leaching from the soil profile with the recovery of soil moisture. The age of the apple orchard before conversion played a dominant role in the accumulation of nitrate nitrogen in the soil after conversion. The older the stand before conversion, the greater the accumulation of nitrate nitrogen and the shallower the depth of leaching after conversion. (3) Soil leaching of the accumulated nitrate nitrogen lagged behind the downward movement of soil moisture. Above all, soil moisture recovered rapidly after the conversion from different age apple orchards to food crops, which accelerated the leaching of nitrate-N, while the downward movement of soil moisture and nitrate-N did not coincide. A combination of soil moisture restoration and loss of soil quality due to rapid leaching of nitrate nitrogen needs to be considered when carrying out conversions. This study has far-reaching implications for rational optimisation of land use structure and improvement of soil quality.

Key Words: Weibei arid plateau; land use change; soil moisture; soil nitrate nitrogen

在过去的几十年里,苹果凭借其较高的经济效益和生态效益在黄土高原得以大面积种植^[1]。然而,随着苹果种植年限的增加以及化肥的大量使用,黄土高原深层土壤干燥化、硝态氮累积等一系列生态环境问题日益显现^[2-5],严重制约了该地区生态稳定与可持续发展。通过长期全年休耕方式可在一定程度上解决种植苹果树造成的土壤干层以及硝态氮累积问题。而在渭北旱塬地区,由于人地矛盾突出,该措施在实际生产生活中难以实施。并且由于近年来苹果种植面积暴增、品种结构单一、价低滞销、投入与产出不成正比、农村劳动力短缺以及我国粮食市场不稳定等问题^[6],为了保证国家粮食安全,黄土高原果园改种玉米等粮食作物已成为普遍现象。因此通过砍伐苹果树改种粮食作物,在耕地利用过程中逐步恢复土壤干层现状以及减少硝态氮累积,可能是解决上述问题有效途径。然而这种土地利用变化后对土壤中水氮会造成怎样的影响鲜有报道。因此,基于现实状况揭示黄土高原土壤水氮与土地利用变化之间的关系,对于合理优化土地利用结构、推动生态环境建设以及改善土壤质量等具有极其深远的意义。

土地利用方式对于土壤水分以及硝态氮的分布有着重要的影响^[7-10]。已有研究表明,由于黄土高原土层深厚,地下水埋藏较深,降水量较少,很难对深层土壤水分进行有效补给,且随着苹果树种植年限增加严重消耗深层土壤水分,造成深层土壤干燥化。因此,如何恢复黄土高原深层土壤干燥化是学者们关注的热点和难点问题。王志强等^[11]研究表明人工林被砍伐或死亡后,至少需要 40—150 a 才能完全补充耗尽的土壤水分。同时,Huang 等^[12]模拟了老化果园去除后土壤水分的补充,表明 0—10 m 土壤剖面恢复的时间(6.5—19.5 a)比 0—3 m 剖面更长。张志强^[13]表明衰老期苹果园被砍伐后大约需要 26 a 才能补充深层土壤水分。然而,这些研究仅考虑了单一特定年限果园种植后土壤水分的恢复情况,土壤深层水分完全补充所需的时间差异很大,不同年限种植果园改种粮食作物后如何影响土壤水分运移及深层干燥化尚不清楚,进一步研究深层土壤补水过程对于正确管理深层土壤水至关重要。此外,黄土高原长期种植苹果园以及过量施肥导致了较高的以硝态氮形式在土壤中大量累积的氮盈余^[14],且果树根系无法使用的包气带(1—5 m)土壤中的硝态氮占总剖面(0—5 m)硝态氮储量的 80%以上^[15],这些无法被利用的硝态氮可能以不同的方式流失到环境中,对环境造成长期潜在威胁^[16-18]。然而在苹果园改种粮食作物后深层土壤硝态氮变化特征的研究仍然较为薄弱。整体而言,土壤水分亏缺和硝态氮累积成为影响黄土高原土壤环境不可忽视的问题,当前研究主要集中

在农田转化为果园后对土壤水氮变化特征及其关系的影响。然而随着果园改种粮食作物后土壤水分和硝态氮的变化特征将会对土壤质量甚至环境产生重大的影响。因此,在不同林龄苹果园改种后土壤水和硝态氮在土壤中的变化特征是一个值得关注和探讨的问题,但是对于此方面的研究却鲜有报道。

因此,依托于黄土高原渭北旱塬研究区域,基于当前不同林龄苹果园改种粮食作物后土壤水氮变化特征研究的不足,采用以空间换时间和配对设计的方法,分析比较苹果园改种植粮食作物前后深层土壤水以及硝态氮含量的变化状况,并探讨土地利用变化后对深层土壤干燥化恢复以及硝态氮累积的影响,以期为黄土高原土壤质量的改善提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄土高原渭北旱塬王东沟流域($107^{\circ}40'30''$ — $107^{\circ}42'30''$ E, $35^{\circ}12'$ — $35^{\circ}16'N$),行政规划属于陕西长武县洪家镇,与甘肃省泾川县交界,是中国科学院长武黄土高原农业生态实验站所在地。王东沟流域属于典型的黄土高原沟壑地形,小流域的面积为 6.3 km^2 ,地貌分为塬面、沟和梁三大单元,分别占土地面积的 35%、35.5%和 29.5%^[19]。塬面位于北部,海拔高度 1215—1225 m,沟口最低点 946 m,高程差 280 m。研究区属于典型的大陆季风气候,年平均气温 9.2°C ,多年平均降水量为 544 mm(1998—2020 年),其中最高年份 813 mm,最低年份为 369 mm,降水年内分布不均,7—9 月降水量占到全年总量的 57%左右。土壤类型主要是黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土质均匀且疏松,孔隙率占 50%左右,通透性良好,土层深厚,可以供植物长期生长。

本研究中苹果园改种的最长年限为 6 a,由图 1 可知长武地区近 6 年的年降雨量分别为 591.9、778.3、715.2、734.6、477.4 mm 和 693.4 mm,平均降雨量为 665.1 mm。长武地区 2021 年取样之前降雨量为 352.2 mm,长武地区长时间序列年均降雨量为 544 mm(1998—2020),除了 2016 年降雨较少外,其余年份降雨量相较较长时间序列的年降雨量有显著的增长,且近 6 年极端降雨较多。

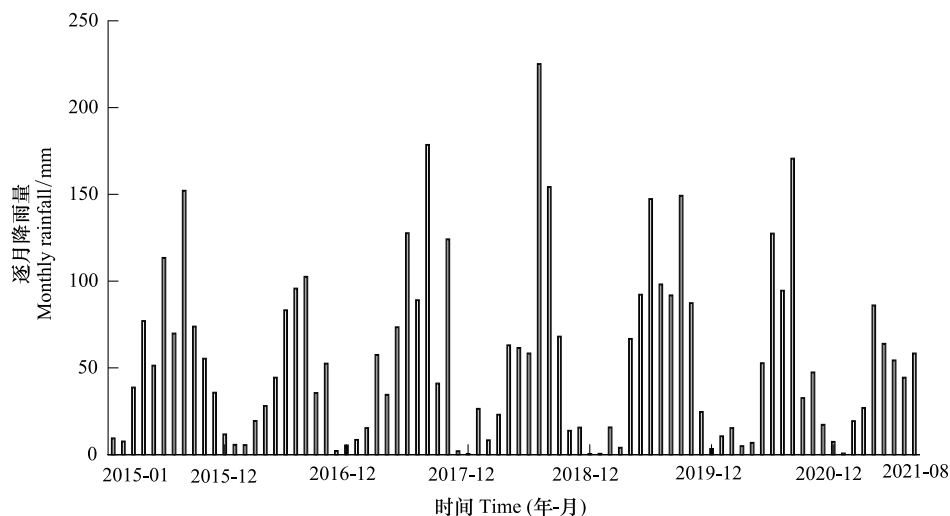


图 1 长武地区降雨量

Fig.1 The rainfall in Changwu county

1.2 研究方法

1.2.1 样点布设及采样方法

为了研究苹果园转化为粮食作物后土壤水氮的分布规律。采用配对设计的方法就近选取样点以降低土壤质地空间变异性和微气象差异的影响,于 2021 年 9 月初在中国科学院长武黄土高原农业生态实验站周围

塬面选取 12 个采样点进行野外采样,采样点包括农田、苹果园以及苹果园转化为粮食作物三类型地块,样地具有相近的地形和海拔。由于就近配对采样,在风成黄土区域内土壤质地水平的变化可以忽略不计。农田为多年种植粮食作物的地块;苹果园中果树的品种为富士,苹果园的树龄分别为 10、15、20、30 a,将它们分别标注为 A10、A15、A20 和 A30;苹果园改种粮食作物的地块年限分别为 10 a 和 30 a 苹果园改种粮食作物 2 a 和 6 a 的地块,15 a 苹果园改种粮食作物 2 a 的地块,20 a 苹果园改种粮食作物 5 a 和 6 a 的地块,将它们分别标注为 C10-2、C10-6、C15-2、C20-5、C20-6、C30-2 和 C30-6。采样点编号 A10 表示种植 10 a 果园,C10-2 表示 10 a 果园改种 2 a 粮食作物,其余与此类似。以上提到的总共 12 个采样点,野外取样时,每种地块设置三个重复,土壤样品的取样深度为 1000 cm,采样间隔为 20 cm。所选取样地基本信息见表 1。

表 1 采样点详细信息

Table 1 Details of sampling sites in the study

样点 Sample Site	样地 Sample area	作物类型 Crop types	利用时间 Planting time	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m
长武	农地	玉米	30 年以上	107°40'43"	35°14'20"	1210
	C10-2	苹果改种玉米	10 年果园改种 2 年玉米	107°41'09"	35°13'59"	1218
	C10-6		10 年果园改种 6 年玉米	107°41'01"	35°14'12"	1216
	C15-2		15 年果园改种 2 年玉米	107°41'03"	35°14'06"	1215
	C20-5		20 年果园改种 5 年玉米	107°41'09"	35°14'11"	1217
	C20-6		20 年果园改种 6 年玉米	107°41'17"	35°14'06"	1215
	C30-2		30 年果园改种 2 年玉米	107°41'32"	35°14'14"	1216
	C30-6		30 年果园改种 6 年玉米	107°41'13"	35°14'17"	1215
	A10	苹果	10 年	107°41'06"	35°14'03"	1217
	A15		15 年	107°41'14"	35°14'19"	1215
	A20		20 年	107°41'01"	35°14'23"	1216
	A30		30 年	107°41'47"	35°14'53"	1219

C:农地 Cropland;A:苹果园 Apple orchard

采样点中,以多年种植粮食作物和不同林龄苹果园的土壤水氮分布剖面为参照,利用不同林龄苹果园的土壤水氮分布剖面来衡量苹果树砍伐之后种植粮食作物土壤水氮的分布变化,以不同林龄苹果园的土壤水分和硝态氮含量为土壤水分恢复和硝态氮运移的起点。(1)多年农地经调研自 1950 年以来一直是农田且大部分时间种植玉米,所以可以代表在长期状况下原生农田的水分状况;(2)苹果园距离苹果园砍伐种植粮食作物的地块较近,且经调查,苹果园的果农培育以及施肥习惯相近且均为雨养果园,因此可以代表不同林龄苹果园砍伐时的土壤水氮分布状况;(3)苹果园改种粮食作物的地块,这些农田是从不同年份被砍伐的苹果园改造成的。例如,C10-2 站点代表果园在 2019 年(2021 年之前的 2 a 年)被移除,并且已经种植了 2 a 粮食作物。被砍伐的苹果园与配对的苹果园具有相同的种植时间和施肥时间。改种后的作物类型经走访调研得知渭北旱塬地区多种植小麦和玉米,而在砍伐苹果园后种植小麦由于浅层养分过高会造成小麦大面积倒伏,影响经济收入,同时玉米的经济价值高于小麦。因此,当地在砍伐苹果园后种植作物都为玉米且在改种粮食作物 1 年内并未施肥,以后正常施肥。

1.2.2 分析方法

通过连续流动注射分析仪(型号:法国 Futura)测定硝态氮、铵态氮。使用烘干法测定土壤水分。

土壤贮水量计算公式为:

$$SWS = w \times BD \times h \times 0.1$$

式中,SWS 为土壤贮水量(mm); w 为质量含水量(g/kg); BD 为土壤容重(g/cm^3); h 为土层厚度(cm);0.1 为换算系数。

恢复地的土壤储水累积恢复量计算公式为:

$$TR = \int_0^L (\theta_{t2} - \theta_{t1}) dz$$

式中, TR 是土壤储水累积恢复量; θ_{t2} 是改种粮食作物地中的土壤含水量 (m^3/m^3); θ_{t1} 是与之对应的不同林龄苹果园的土壤含水量 (m^3/m^3); L 是土壤剖面深度 (cm)。

土壤硝态氮累积量计算公式:

$$\text{RSN} = BD \times h \times C \times 10^4$$

式中, RSN 为土壤硝态氮累积量 (kg/hm^2); h 为土层厚度 (cm); C 为硝态氮浓度 (mg/kg)。

1.3 数据分析

为实现研究目标, 本研究对所采用的研究数据进行以下处理和分析: (1) 采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 23.0 统计软件对土壤水分及硝态氮数据进行基本统计分析; (2) 采用差异显著性分析方法 (Duncan) 方法对土壤含水量和硝态氮累积量进行多重比较分析, 采用 Origin 2019 软件进行各类型地块土壤水含量以及硝酸盐含量的图形绘制; (3) 采用结构方程模型分析各类型因素对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响与间接影响。

2 结果与分析

2.1 果园改种粮食作物后土壤水分的变化特征

由图 2 可知, 改种玉米后, 由于玉米主要利用 0—3 m 深度的土壤水分, 同时农户种植密度过大, 相较于种植果园时 ($P < 0.05$) 显著降低了该土层土壤含水量。因此将 0—3 m 定义为浅层土壤, 3—10 m 定义为深层土壤来研究土壤水分恢复情况。不同林龄苹果树改种粮食作物 2、5 a 和 6 a 之后, 3—7 m 土壤剖面含水量有了显著的恢复。在不同林龄苹果园改种粮食作物的 2 年时, 补给深度迅速向下移动至约 7 m 的深度。相比于改种作物 2 a, 改种 6 a 后, 补给深度并未显著向下移动, 但是显著增加了 3 m 至 7 m 土层的含水量 ($P < 0.05$)。如表 2 所示, 在 0—10 m 土壤剖面内, 采样点 C15-2、C20-5、C20-6、C30-2 和 C30-6 的土壤含水量均值分别是多年农地稳定土壤含水量 (21.22%) 的 76%、79%、85%、73% 和 79%, 相比于改种前 10、15、20 a 和 30 a 果园的土壤含水量均值占多年农地稳定土壤含水量的 89%、73%、76%、69%, 改种后土壤含水量在逐渐恢复至多年

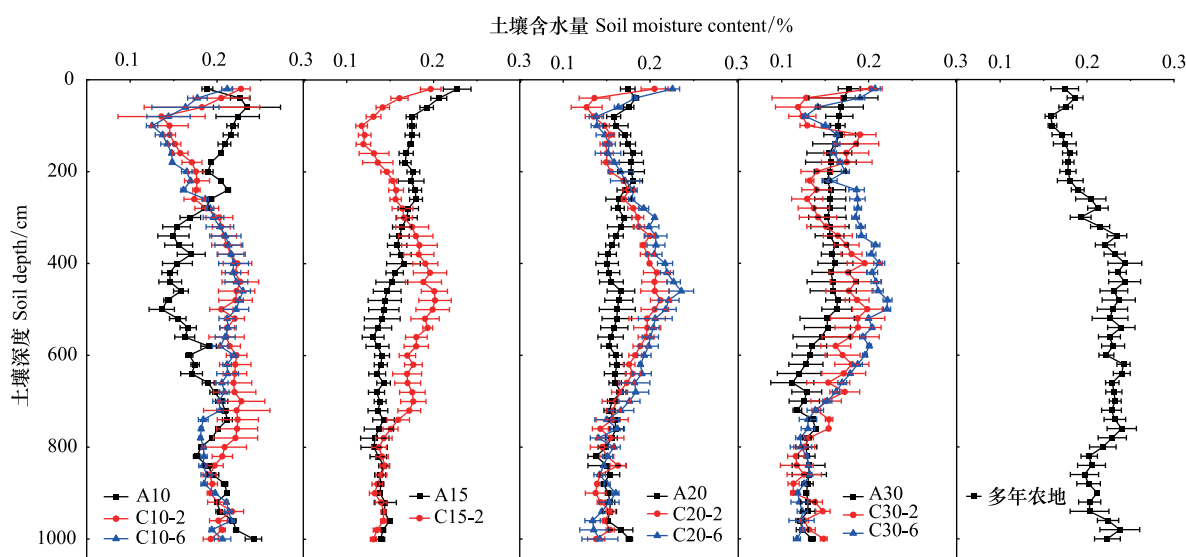


图 2 改种前后土壤水分变化

Fig. 2 Changes in soil moisture before and after replanting

C: 农地 Cropland; A: 苹果园 Apple orchard

农地稳定土壤含水量。而对于 10 a 果园改种 2 a 和 6 a 粮食作物土壤水分恢复程度并无显著的差异且土壤含水量均值与多年农地稳定土壤含水量(21.22%)相近,这可能是由于 10 a 苹果园改种粮食作物 2 a 后土壤 0—10 m 深度剖面水分可恢复至接近多年农地稳定土壤含水量(21.22%)。如表 2 所示,10、15、30 a 果园改种 2 a 粮食作物后 3—10 m 土壤水分累积恢复量分别为 273.33、203.93 mm 和 158.17 mm。结果表明随着果园种植年限的增长,在改种粮食作物 2 a 后的土壤水分累积恢复量逐渐减少,而在改种粮食作物 6 a 后并无显著差异。

表 2 土壤水分恢复变化

Table 2 Soil Moisture Recovery Changes

土地利用方式 Land use pattern	土层水分恢复深度 Soil moisture recovery depth/m	3—10 m 累积恢复量 3—10 m Cumulative recovery capacity/mm	3—10 m 累积量 3—10 m Cumulant/mm	0—10 m 土壤含水量均值 Mean soil water content/%	与多年农地稳定含水量比值 Ratio of stable moisture content to that of perennial cropland
C10-2	8.6	273.33	1888.81	20.12	0.95
C10-6	8.0	251.11	1866.59	19.65	0.93
C15-2	8.4	203.93	1474.79	16.03	0.76
C20-5	7.0	137.92	1532.61	16.87	0.79
C20-6	8.4	243.41	1638.09	18.04	0.85
C30-2	8.0	158.17	1391.15	15.47	0.73
C30-6	7.4	236.06	1469.04	16.69	0.79

2.2 苹果园改种粮食作物后土壤硝态氮的变化特征

由图 3 可知,10、15、20、30 a 苹果园的土壤硝态氮累积峰分别位于 0—2、0—4、0—5 m 和 0—5 m 的土壤深度。随着土地利用的变化,10、15、30 a 苹果园改种粮食作物 2 a 后累积峰随土壤水分别迁移到了 4—7、2—5 m 和 1—5 m 的土壤深度;20 a 和 30 a 苹果园改种粮食作物 6 a 后累积峰随土壤水分分别迁移到了 4—8 m 和 3—6 m;20 a 苹果园改种粮食作物 5 a 后累积峰随土壤水分迁移到了 2—6 m。特别是土壤硝态氮在 10 a 苹果园改种 6 a 粮食作物的地块中,出现多个硝态氮峰值。研究结果表明不同林龄苹果园改种粮食作物后硝态氮在土壤剖面上迅速发生了淋溶现象,且苹果园林龄越长,样地在改种粮食作物后土壤硝态氮累积峰下移越缓慢。但在短暂的改种时间内,硝态氮累积峰迅速迁移至 1 m 土层以下的深度,由表 3 可知超过 95%的硝

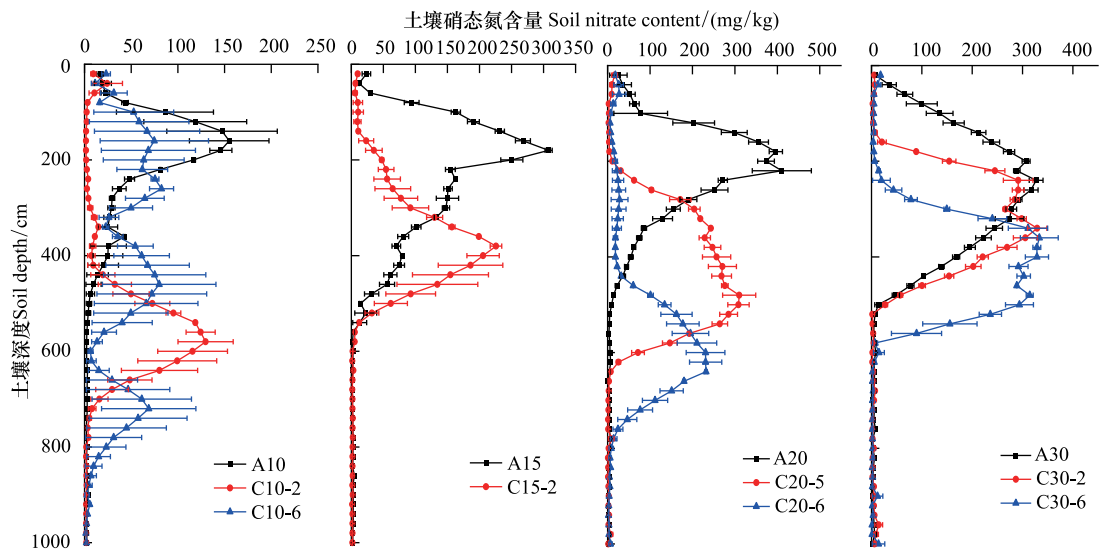


图 3 改种前后土壤硝态氮含量变化

Fig.3 Changes of soil nitrate nitrogen content before and after replanting

态氮位于 1 m 土层以下,从植物营养的角度来看,玉米无法利用 1 m 土层以下的硝态氮,认为是氮的损失。

如表 3 所示,10、15、20、30 a 苹果园土壤剖面 0—10 m 深度的硝态氮累积量分别为 3355.65、7713.06、9346.43 kg/hm²和 11452.86 kg/hm²。随着土地利用变化,10、15、30 a 苹果园改种粮食作物 2 a 后土壤剖面 0—10 m 深度的硝态氮累积量分别为 3080.56、5344.80 kg/hm²和 9263.05 kg/hm²;20 a 和 30 a 苹果园改种粮食作物 2 a 后土壤剖面 0—10 m 深度的硝态氮累积量分别为 7159.04 kg/hm²和 9905.70 kg/hm²;特别的是 20 a 苹果园改种粮食作物 5 a 后土壤剖面 0—10 m 深度的硝态氮累积量为 11452.86 kg/hm²,这是由于该地块种植苹果园时过量施肥造成的。上述研究表明改种前苹果园的树龄越长,改种后地块中硝态氮的累积量越大,且不同林龄苹果园改种后 0—10 m 内土壤硝态氮累积量出现显著的降低($P<0.05$)。样地的硝态氮浓度峰值大小、深度和宽度(垂直距离)差异较大,沿土壤垂直深度表现为种植苹果树年限越短的地块改种粮食作物后累积的硝态氮淋溶的越深,宽度表现为种植的苹果树年限越长的地块改种粮食作物后累积的硝态氮峰值浓度越大。

表 3 改种前后各土层硝态氮累积量及占比

Table 3 Cumulative amount and proportion of nitrate nitrogen in each soil layer before and after replanting

土地利用方式 Land use pattern	0—2 m		2—4 m		4—6 m		6—8 m		8—10 m		0—10 m
	累积量		累积量		累积量		累积量		累积量		累积量
	Cumulant / (kg/hm ²)	%	Cumulant / (kg/hm ²)	%	Cumulant / (kg/hm ²)	%	Cumulant / (kg/hm ²)	%	Cumulant / (kg/hm ²)	%	Cumulant/ (kg/hm ²)
A10	2140.43	64	911.78	27	171.40	5	66.31	2	65.74	2	3355.65
C10-2	144.36	5	177.57	6	1950.54	63	758.33	24	49.76	2	3080.56
A15	3856.94	50	3033.48	39	697.96	9	53.37	1	71.30	1	7713.06
C15-2	415.74	8	3122.22	59	1706.46	31	53.19	1	47.20	1	5344.80
A20	4623.83	50	4155.37	44	371.91	4	116.18	1	79.14	1	9346.43
C20-5	166.57	1	4371.19	41	6014.85	56	145.98	1	64.08	1	10762.67
C20-6	361.15	5	562.20	8	3368.96	47	2751.51	38	115.22	2	7159.04
A30	3777.64	33	6434.38	56	1024.66	9	120.25	1	95.93	1	11452.86
C30-2	728.15	8	6921.65	75	1375.91	15	92.48	1	144.86	1	9263.05
C30-6	167.81	2	4575.12	46	4985.83	50	67.39	1	109.55	1	9905.70

2.3 苹果园改种粮食作物后土壤水氮关系

本研究使用结构方程模型模型分析了改种前苹果园种植年限、改种后粮食作物种植年限以及土壤深度对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响,以及由改种前土壤硝态氮累积量、改种前土壤储水量和改种后土壤储水量为介导的间接影响。若仅考虑驱动因素对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响,则由图 4 可知改种前苹果园种植年限与改种后土壤硝态氮累积量呈现正相关关系($r\partial = 0.33, P<0.001$)。特别的是,间接影响结果表明,改种前苹果园种植年限以改种前土壤硝态氮累积量、储水量和改种后土壤储水量为介导与改种后土壤硝态氮累积量呈现出负相关关系($r\partial = -0.128$),与直接影响结果相反。但在标准化总效应的分析中,相关关系与直接影响的相关关系结果一致,改种前苹果园种植年限与改种后土壤硝态氮累积量呈现出正相关($r\partial = 0.204$)。改种后粮食作物种植年限以改种后土壤储水量为介导与改种后土壤硝态氮累积量呈现出正相关关系($r\partial = 0.075$),这表明改种前苹果园种植年限对于改种后土壤硝态氮累积量起决定性作用,而改种后种植粮食作物年限对于改种后硝态氮的累积量影响较为微弱。

路径分析表明,土壤深度对于改种后硝态氮累积量产生了负向影响($r\partial = -0.156$)。由于土壤水是硝态氮运动的主要载体,改种后土壤储水量对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响最显著($r\partial = 0.137, P<0.001$)。

土壤剖面中硝态氮的淋失是以水为载体,如表 4 所示,土壤水分恢复深度为 7.0—9.0 m,响应的硝态氮最深累积到 7.8 m。10、15、30 a 苹果园改种 2 a 粮食作物后硝态氮累积峰分别迁移至>7.0、>5.5 m 和>5.0 m 的

深度,而水分运移锋面分别迁移至 8.6、8.4 m 和 8.0 m;20 a 和 30 a 苹果园改种 6 a 粮食作物后硝态氮累积峰分别迁移至>7.8 m 和>6.0 m 的深度,而水分运移锋面分别迁移至 8.4 m 和 7.4 m;20 a 苹果园改种 5 a 粮食作物后,硝态氮累积峰迁移至>6.5 m 的深度,而水分运移锋面迁移至 7.0 m。上述研究表明土地利用变化后土壤累积硝态氮淋失的垂直运动速度慢于土壤水分的垂直运动速度。因此,土壤累积硝态氮的淋失滞后于土壤水分的向下运动。

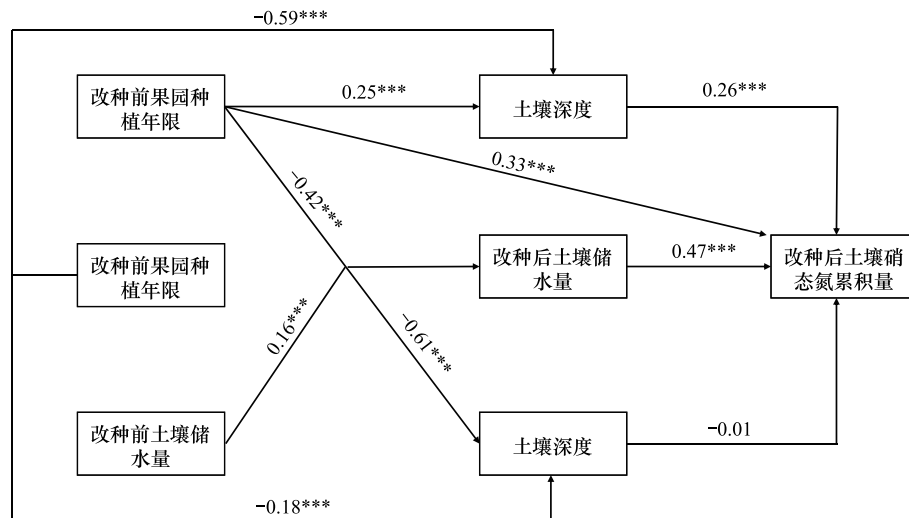


图 4 改种后土壤硝态氮累积量结构方程模型

Fig.4 Structural equation model for soil nitrate nitrogen accumulation after replanting

SEM;结构方程模型 Structural equation model;CMIN:卡方值 Chi-square;GFI:拟合优度指数 Goodness of fit index;RMSEA:近似误差均方根 Root mean square error of approximation。拟合改种前果园种植年限、改种后粮食作物种植年限、土壤深度与改种前后土壤储水量、硝态氮累积量之间的联系 (CMIN = 32.736, GFI = 0.975, RMSEA = 0.075, $P = 0.001$)。与箭头相邻的数字代表标准化路径系数 (*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$)

表 4 改种后土壤水分恢复深度及硝态氮淋失深度

Table 4 Depth of soil moisture recovery and nitrate leaching depth after replanting

土地利用方式 Land use pattern	土层水分恢复深度 Soil moisture recovery depth/m	硝态氮淋失深度 Depth of nitrate leaching/m	土地利用方式 Land use pattern	土层水分恢复深度 Soil moisture recovery depth/m	硝态氮淋失深度 Depth of nitrate leaching/m
C10-2	8.6	>7.0	C20-6	8.4	>7.8
C15-2	8.4	>5.5	C30-2	8.0	>5.0
C20-5	7.0	>6.5	C30-6	7.4	>6.0

3 讨论

3.1 不同林龄苹果园改种粮食作物后土壤水分的恢复

深层土壤水管理对于生态系统水文过程及作物应对干旱逆境等至关重要,然而果园砍伐改种粮食作物后的深层土壤水如何随时间演变的研究较为匮乏。本研究通过配对采样,分析发现在不同林龄苹果树砍伐之后,土壤的储水量开始得到恢复,并且累积恢复量以及恢复深度随着恢复的年限增加而增加。在恢复期的前两年,土壤水分可以迅速恢复到 7 m 左右深度,这一结论与张志强等^[13]研究结果一致,但是他们研究集中在衰老期的苹果园改种后的土壤水分恢复,而我们调研涵盖了初果期,盛果期以及衰老期苹果园,综合考虑苹果园种植年限得出以上结论。此外,形成这种现象的原因一方面可能与降雨强度有关,长武地区近六年的降雨量明显高于该地区的平均降雨量,且存在极端降雨的情况,另一方面可能与和降水入渗的方式有关,任泽莹、

黄亚楠等^[20-21]研究表明土壤水分存在活塞流与优先流两种补给方式,优先流的补给量平均占总补给量的 49.38%,优先流补给会迅速入渗到较深的深度;本研究中的优先流可能与苹果根系腐烂形成根孔,改善了土壤入渗性能有关,根据调研结果显示,苹果在砍伐时只会去除地上部分,根系会继续留在土壤中,Angers 和 Caron (1998)^[22]研究认为活根系通过其表层饱和水膜、根系的收缩来形成优先路径,而死根系通过根孔隙加强水的运动速率来形成优先迁移的路径,死根系比活根系更加有利于优先流的形成。

研究中恢复期的前两年土壤储水量迅速增加,在恢复 2 a 之后,土壤储水量的增长速率出现了显著的降低,这一结论与张志强等, Li 等^[13,23]研究结果一致。而对于种植过不同林龄果树的样地,随着苹果园种植年限的增长,在改种粮食作物 2 a 后的土壤水分累积恢复量逐渐减少,而在改种粮食作物 6 a 后的土壤水分累积恢复量并无显著差异。这可能是由于随着果树种植年限增长,土壤干燥化现象加剧,即果园改种粮食时土壤前期含水量存在差异^[24]。前期土壤含水量对农田水文过程具有显著影响,尤其是长期果树种植导致土壤干燥化,其转化为农田后短期内降雨主要补充浅层土壤水,前人研究表明,浅层土壤水主要被作物利用和蒸发损耗^[25]。因此,土壤水分累计恢复量的差异可能归因于果园转化为农田时土壤含水量的差异。

王学春等^[26]的研究结果表明玉米主要利用 0—3 m 深度的土壤水分,与本研究结果相同,由于农户种植密度过大,导致 0—3 m 深度的土壤水分减少,3—10 m 深度的土壤水分随着改种时间的增长逐渐恢复,但不同林龄的苹果园水分恢复至多年农地稳定含水量年限不同。

3.2 不同林龄改种粮食作物后硝态氮的运移及水氮关系

渭北旱塬地区多半是雨养农业,降雨年内分布不均,降雨多集中在 7—9 月份,单次强度大,同时种植苹果树施肥量大,利用效率较低,这就导致了土壤硝态氮淋失与累积的发生。黄亚楠等^[21]指出 10 a 苹果园硝态氮浓度与农地相近,介于 0.4—69.4 mg/kg,峰值出现在 0.8—5.2 m;20 a 苹果园土壤剖面中硝态氮浓度介于 0.8—384.2 mg/kg,峰值深度均在 2 m 以下。因此,多年种植苹果树累积大量的硝态氮将会对地下水质量造成严重的影响,本研究针对当地砍伐苹果园后改种粮食作物的现象,以空间换时间,更好的体现土地利用变化后累积硝态氮的运移情况。Perego 等^[27]研究发现,硝态氮在降雨和灌溉水的作用下沿着土壤剖面中向下移动,与本研究结果一致。本研究中都为雨养土地,随着降雨的补给,不同林龄苹果园改种粮食作物后影响了土壤剖面中硝态氮的积累和分布,硝态氮迅速发生淋失,其中土壤硝态氮在 10 a 苹果园改种 6 a 粮食作物的地块中,出现多个硝态氮峰值,可能是由于改种粮食作物 2 a 后土壤水分已经逐渐恢复至接近多年农地稳定土壤含水量,而土壤中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 到一定的土壤湿度就几乎全部溶解于土壤溶液中,因此 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要以溶质的形式存在于土壤溶液中,同时由于优先流与活塞流并存,部分硝态氮随着优先流迅速淋失,导致出现了多个硝态氮峰值。其他样地仅存在一个硝态氮峰值,而且随着种植苹果树年限越长导致土壤干燥化,样地改种粮食作物后限制了硝态氮进一步渗入深层土壤。而硝态氮的淋失涉及硝态氮在土壤溶液中的逐渐稀释和扩散,因此,它与土壤水的运动不完全一致^[28]。Zhang^[29]的研究中硝态氮的淋失滞后于土壤水的向下运动,与本研究结果一致,在土壤水分恢复过程中,土壤累积硝态氮淋失滞后于土壤水的补给。

根据黄亚楠等^[21]研究表明,虽然苹果园的硝态氮累积量明显高于农地,但同时苹果园的土壤剖面水含量相应减少,先前的研究已经指出^[27-29],土壤水是硝态氮运动的载体,但只有饱和土壤水才能诱导硝态氮运动和积累^[30]。因此多年种植苹果树造成土壤干燥化导致土壤中硝态氮随水下渗的可能性减少,相同时间内苹果园实际输入地下水中的污染物较农地更少,影响地下水质的首要因素是补给量。随着苹果园改种粮食作物,土壤剖面的含水量逐渐恢复,地下水的补给量随之增加,原本种植苹果树时累积的硝态氮在改种玉米后样地 0—10 m 内土壤硝态氮累积量出现显著的降低,经走访调研发现这可能是由于改种粮食作物后农户在前 1a 不会施加肥料,粮食作物生长所消耗导致硝态氮累积量出现显著的降低,另一方面随着土壤水分的逐渐恢复,硝态氮在土壤溶液中逐渐稀释以及发生水平扩散导致硝态氮的含量降低^[31]。而对于土壤中硝态氮的同化,土壤中微生物优先利用铵态氮,因此可忽略不计^[32]。剩余硝态氮随着降水的补给向下移动,可能将会导致大量的硝态氮输入地下水中,对地下水水质造成严重的影响。当地农户生活用水主要来自地下水,水质降低会

对当地的生产、生活造成严重的影响。

4 结论

渭北旱塬苹果园大面积改种粮食作物缓解了土壤干燥化现象,不同林龄苹果园在改种后 2 a 时土壤水分迅速恢复至 7.0 m 左右深度,在改种后 2—6 a 时间段内补给深度并未显著增加,但 3.0—7.0 m 内各层土壤含水量在不断增长。改种后土壤储水量对于改种后土壤硝态氮累积量的直接影响最显著,随着土壤水分的逐渐恢复造成了土壤剖面中累积硝态氮的迅速淋失,然而改种后土壤中硝态氮的向下移动与土壤水分的移动并不完全一致,有一定的滞后性。改种前苹果园种植年限对于改种后土壤硝态氮累积量起决定性作用,随着种植果树年限越长,改种玉米后硝态氮累积量越大,向下移动的速率越慢。基于渭北旱塬苹果园改种粮食作物的实际现象,本研究对缓解渭北旱塬区多年种植苹果园造成的深层土壤干燥化以及硝态氮累积问题提供了新的见解。

参考文献(References):

- [1] Liu Z J, Ma P Y, Zhai B N, Zhou J B. Soil moisture decline and residual nitrate accumulation after converting cropland to apple orchard in a semiarid region: evidence from the Loess Plateau. *CATENA*, 2019, 181: 104080.
- [2] 马南方,高晓东,赵西宁,赵连豪,刘华清,杨孟豪.黄土丘陵区退耕小流域土壤有机碳分布特征及地形植被对其的影响. *生态学报*, 2022, 42(14): 5838-5846.
- [3] 陈东凯,骆汉,吕佼容,张炳学,刘顿,谢永生.渭北旱塬矮砧密植苹果园土壤矿质氮积累与空间分布特征. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 97-103.
- [4] 杨磊,张子豪,李宗善.黄土高原植被建设与土壤干燥化:问题与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7382-7388.
- [5] Bai X, Jia X X, Jia Y H, Shao M A, Hu W. Modeling long-term soil water dynamics in response to land-use change in a semi-arid area. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124824.
- [6] 陈睿山,郭晓娜,熊波,王尧,陈琼.气候变化、土地退化和粮食安全问题:关联机制与解决途径. *生态学报*, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [7] 刘新春,赵勇钢,刘小芳,朱兴菲,高冉,栗文玉.晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系. *生态学报*, 2019, 39(21): 7987-7995.
- [8] Xin J, Liu Y, Chen F, Duan Y J, Wei G L, Zheng X L, Li M. The missing nitrogen pieces: a critical review on the distribution, transformation, and budget of nitrogen in the vadose zone-groundwater system. *Water Research*, 2019, 165: 114977.
- [9] Yang S H, Wu H Y, Song X D, Dong Y, Zhao X R, Cao Q, Yang J L, Zhang G L. Variation of deep nitrate in a typical red soil Critical Zone: effects of land use and slope position. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 297: 106966.
- [10] Li H, Si B C, Li M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 164-174.
- [11] 王志强,刘宝元,王旭艳,韩艳锋.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77-83.
- [12] Huang M B, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1/2): 67-76.
- [13] 张志强.渭北旱塬农林复合区深根经济林对深层土壤水和深层渗漏的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [14] Zhu X Q, Fu W H, Kong X J, Chen C X, Liu Z J, Chen Z J, Zhou J B. 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107574.
- [15] Chen M Y, Shao M A, Wei X R, Li T C, Shen N, Mi M X, Zhao C L, Yang X, Gan M, Bai X, Li A. Response of the vertical distribution of soil water and nitrogen in the 5 m soil layer to the conversion of cropland to apple orchards in the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 333: 107960.
- [16] Townsend A R, Howarth R W, Bazzaz F A, Booth M S, Cleveland C C, Collinge S K, Dobson A P, Epstein P R, Holland E A, Keeney D R, Mallin M A, Rogers C A, Wayne P, Wolfe A H. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(5): 240-246.
- [17] Colla G, Kim H J, Kyriacou M C, Roupheal Y. Nitrate in fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 221-238.
- [18] Cui M, Zeng L H, Qin W, Feng J. Measures for reducing nitrate leaching in orchards: a review. *Environmental Pollution: Barking, Essex*, 1987, 2020, 263(Pt B): 114553.
- [19] 张嘉宁,王继军.黄土高原沟壑区王东沟流域土地利用/覆被变化过程初探. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 231-235.
- [20] 任泽莹,赵勇钢,吕银彦,尚月婷,王永彬,韩乐乐,刘小芳.汾河流域下游不同土地利用方式下优先流区与基质流区土壤团聚体稳定

- 性分析. 水土保持研究, 2022, 29(6): 59-64.
- [21] 黄亚楠. 黄土塬区土地利用变化对地下水补给及水质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [22] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. Plant-induced soil changes: Processes and feedbacks. Dordrecht: Springer, 1998: 55-72.
- [23] Li H, Si B C, Zhang Z Q, Miao C H. Deep soil water storage and drainage following conversion of deep rooted to shallow rooted vegetation. Agricultural Water Management, 2022, 261: 107359.
- [24] 陶泽. 黄土塬区果园深层土壤水消耗特征及其对水平衡的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [25] 林文. 地膜和秸秆覆盖对黄土高原旱作农田土壤水库与作物产量的影响[D]. 北京: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [26] 王学春. 黄土高原中部旱作粮田土壤干燥化效应与土壤水分承载力模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [27] Perego A, Basile A, Bonfante A, de Mascellis R, Terribile F, Brenna S, Acutis M. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 147: 57-65.
- [28] Dai J, Wang Z H, Li M H, He G, Li Q, Cao H B, Wang S, Gao Y J, Hui X L. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China. Field Crops Research, 2016, 196: 180-190.
- [29] Zhang Y, Dong X, Yang X L, Munyampirwa T, Shen Y Y. The lagging movement of soil nitrate in comparison to that of soil water in the 500-cm soil profile. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 326: 107811.
- [30] Hack-ten Broeke M J D. Irrigation management for optimizing crop production and nitrate leaching on grassland. Agricultural Water Management, 2001, 49(2): 97-114.
- [31] 邓建才, 陈效民, 柯用春, 蒋新, 卢信. 土壤水分对土壤中硝态氮水平运移的影响. 中国环境科学, 2004, 24(3): 280-284.
- [32] 程谊, 黄蓉, 余云飞, 王慎强. 应重视硝态氮同化过程在降低土壤硝酸盐浓度中的作用. 土壤学报, 2017, 54(6): 1326-1331.