

保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响

胡锦涛^{1,2} 樊军^{1*} 付威³ 王欢³ 郝明德¹

(¹中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学,北京 100049; ³西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要 通过渭北旱塬春玉米 15 年定位试验,研究 6 种保护性耕作方式,即传统翻耕(CT)、免耕(NT)、免耕配施生物炭(NB)、免耕秸秆覆盖(NS)、免耕地膜覆盖(NF)和免耕秸秆地膜覆盖(NSF)对土壤水分与硝态氮淋溶的影响,探索适宜于该区可持续发展的农田管理措施。结果表明:与 NT 相比,第一次水分补给时期 0~100 cm 土层,CT 处理水分补给量无显著差异,NS、NB、NSF 和 NF 处理显著降低;在 100~300 cm 土层,NS、NB、NF 和 NSF 处理显著增加了水分补给量,CT 显著低于 NT 处理。第二次水分补给时期,水分补给主要集中在 0~100 cm 土层,且各处理与 NT 水分补给量无显著差异。水分消耗时期,各处理与 NT 处理在 0~100 cm 土层消耗量无显著差异,NF 和 NSF 在 100~300 cm 土层水分消耗量显著增加,分别增加了 33.9% 和 59.9%。在 0~200 cm 土层,与 NT 相比,CT 处理显著增加了硝态氮累积量,是 NT 的 2.2 倍,NS、NB、NF 和 NSF 处理显著减少了硝态氮累积量,分别减少了 44.6%、61.5%、69.2% 和 69.8%;而在 200~300 cm 土层,NS 处理显著增加了硝态氮累积量,CT 与 NT 处理无显著差异,NB、NF 和 NSF 处理显著减少。土壤水分运动能显著影响硝态氮在土壤剖面的分布,NB、NF 和 NSF 处理硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层,NS 主要分布在 0~100 cm 和 200~300 cm 土层,而 NT 和 CT 处理硝态氮在整个剖面大量分布,其中 NS、NT 和 CT 处理出现两个硝态氮累积峰。不同农田管理措施通过对水分的调控减少硝态氮淋溶,进而提高氮素利用效率,其中免耕基础上秸秆地膜覆盖能有效调控土壤水分运动和减少硝态氮淋溶累积,是旱塬区改善农田水肥状况,增加作物产量的可行措施。

关键词 硝态氮; 水分运动; 免耕; 生物炭; 地膜覆盖; 秸秆覆盖

Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^- -N leaching in dryland maize cropland. HU Jin-sheng^{1,2}, FAN Jun^{1*}, FU Wei³, WANG Huan³, HAO Ming-de¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Department of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Based on a field experiment on conservation tillage over 15 years in Weibei Highland maize cropland, six conservation tillage patterns, *i.e.*, conventional tillage (CT), no-tillage (NT), no-tillage plus biochar (NB), no-tillage and straw mulching (NS), no-tillage and plastic film mulching (NF), and no-tillage and straw-plastic film mulching (NSF), were investigated for their effects on soil water and nitrate nitrogen (NO_3^- -N) leaching, to seek sustainable agricultural cultivation measures suitable for the region. Results showed that, compared with NT treatment in the first water recharge period, CT had no effect on water recharge in 0-100 cm soil layer, and NS, NB, NSF and NF significantly reduced soil water recharge. In 100-300 cm soil layer, NS, NB, NF and

本文由中国科学院西部青年学者 A 类项目(XAB2015A03)和国家自然科学基金项目(41571224)资助 This work was supported by the Western Young Scholars Project (Class A) of Chinese Academy of Sciences (XAB2015A03) and the National Natural Science Foundation of China (41571224). 2018-10-16 Received, 2019-01-30 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

NSF significantly increased soil water recharge, but CT significantly reduced soil water recharge. During the second water recharge period, water recharge depth was mainly concentrated in 0–100 cm soil layer, and there was no significant difference between each treatment and NT. During the water depletion period, compared with NT treatment, other treatments had no significant effect on water depletion in 0–100 cm soil layer, but NF and NSF increased soil water depletion by 33.9% and 59.9% in 100–300 cm soil layer, respectively. In 0–200 cm soil layer, compared to NT, CT significantly increased the accumulation of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ by 2.2 fold, NS, NB, NF and NSF reduced soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ accumulation by 44.6%, 61.5%, 69.2% and 69.8%, respectively. In 200–300 cm soil layer, NS significantly reduced the accumulation amount of $\text{NO}_3^- \text{-N}$, but CT had no significant effect on the accumulation amount of $\text{NO}_3^- \text{-N}$, and NS, NB, and NSF all had negative effects on $\text{NO}_3^- \text{-N}$ accumulation. Soil water movement had significant effect on the distribution of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in soil profile. Soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ was mainly distributed in 0–40 cm soil layer for NB, NF and NSF treatments, in 0–100 cm and 200–300 cm soil layers for NS treatment, and over the entire profile for NT and CT, and NS, NT and CT treatments had two $\text{NO}_3^- \text{-N}$ accumulation peaks in soil profile. Different agricultural cultivation measures could reduce soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ leaching by regulating soil water content, and subsequently improve nitrogen utilization efficiency. Among those measures, NSF could effectively control soil water movement to reduce the $\text{NO}_3^- \text{-N}$ leaching and accumulation, and thus is a feasible measure to improve soil water and fertility conditions and increase dryland maize yields.

Key words: $\text{NO}_3^- \text{-N}$; soil water movement; no-tillage; biochar; plastic film mulching; straw mulching.

自 20 世纪 70 年代开始,氮肥用量的不断增长对提高我国农业生产水平起到了重要作用^[1].但氮肥利用率低的问题在我国普遍存在,氮肥损失严重并引发了相关的环境问题^[2].据统计,我国主要粮食作物的氮肥利用率为 27.5%,呈逐渐下降的趋势^[3].春玉米是渭北旱塬普遍种植的粮食作物之一,生产面临的主要问题是年降水偏少、变化率较大且时空分布不均,施肥偏多但利用率低,缺少有效的保水保肥措施.水分和养分是限制作物高产稳产的关键,春玉米传统耕作休闲期干旱少雨,裸露地表使得土壤水分大量蒸发,播种期底墒不足,产量低且不稳定^[4],长期不合理施用氮肥会破坏土壤结构、恶化农田土壤理化性质、降低氮肥增产效率和作物产量,利用率随之降低,可能导致氮素严重残留和淋溶^[5].如何利用合理的水肥调控措施提高氮肥利用率、减少氮素损失和增加作物产量是迫切需要解决的问题.相比于传统翻耕,免耕能改善土壤结构和物理性状、增加土壤储水量、提高水分利用效率和土壤肥力,促进作物生长发育^[6-7].但研究认为,长期的免耕措施不利于土壤的疏松和肥料的翻埋,使得地表容重、紧实度增加,储水保墒能力和肥力降低,表层养分富集,作物根系生长和对水分、养分利用受到影响^[8],最终可能导致不增产甚至减产^[9].目前研究主要集中在保墒蓄水和增产上,对免耕条件下氮素利

用、硝态氮累积淋溶研究较少^[4,7].因此,研究免耕结合不同覆盖措施对改善土壤水肥状况、提高水分和氮素利用率、减少硝态氮残留与淋溶的效果,确保作物高产稳产得到越来越多的关注.地膜覆盖能够改善土壤水热状况,增强微生物活性,促进土壤有机碳、氮的矿化,提高养分有效性^[10].陕西长武连续两年大田试验表明,覆膜可以提高表层土壤含水量,减缓硝态氮向土壤下层迁移的速度,从而提高氮肥利用率和作物对土壤氮素的吸收量^[11].秸秆覆盖能平抑地温,促进土壤肥力的培育,协调土壤水分和养分的供应,增加土壤有机质的积累^[12].陕西关中地区连续两年田间免耕试验显示,免耕覆盖可显著降低夏玉米耗水量,增加地上部分吸氮量,提高夏玉米的水、氮利用效率,较免耕处理水分利用效率和氮素利用率分别提高 20.0% 和 6.1%^[13].已有研究表明,生物炭能影响土壤持水性和水分入渗,吸附硝酸盐,提高氮肥的有效性,具有一定的保水保肥性能^[14-15].高德才等^[3]的室内模拟土柱试验表明,生物炭添加可减少 3.2%~11.9% 的硝态氮淋失.但目前对生物炭输入后土壤硝态氮淋溶状况的研究多集中于室内人工模拟试验^[16],有必要开展相应的大田长期定位试验.水分作为土壤硝态氮运载体,研究认为二者存在密切关联,硝态氮带负电荷,很难被土壤胶体吸附,极易随水淋溶,其在土壤剖面的累积和分布受土

壤水分状况及作物对土壤水分利用的影响^[17].为了探索适合该区的的水分和氮肥管理措施,提高水肥利用效率,减少硝态氮淋溶累积,通过在渭北旱塬的定位试验,研究了在免耕方式下结合地膜、秸秆和生物炭3种不同措施对土壤水分运动和硝态氮淋溶的影响,以期黄土塬区旱地农业的可持续发展提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省长武县中国科学院长武黄土高原农业生态实验站(35°12' N, 107°40' E),是典型的雨养农业区.该区土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,地势平坦,土层深厚,土壤容重1.23~1.44 g·cm⁻³,土壤剖面通透性好,肥力中等.海拔1200 m,气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量578.5 mm,季节性分布不均,降雨集中在7—9月.春玉米一个完整的生长年包括休闲期和生育期,时间跨度在当年10月到次年9月,其中10月至次年4月为休闲期,5月至9月为生育期.2008—2017年春玉米休闲期平均降水127.6 mm,生育期为426.8 mm,试验期2016—2017生长年降水集中在生育期,休闲期降水只占整个生长年的29.2%(表1和图1).年均潜在蒸发量1500 mm,平均温度9.1℃,塬面≥0℃活动积温3688℃,≥10℃活动积温3029℃.年日照时数2226 h,热量供作物一年一熟有余,无霜期171 d,地下水水位50~80 m.春玉米是该地区主要粮食作物,种植面积仅次于冬小麦.

表1 2008—2017年玉米休闲期和生育期降水量
Table 1 Rainfall in summer fallow periods and growth periods of maize from 2008 to 2017

年份 Year	休闲期 Summer fallow period	生育期 Growth period	生长年 Growing year
2007—2008	125.1	423.3	548.4
2008—2009	85.7	384.7	470.4
2009—2010	139.9	436.9	576.8
2010—2011	55.6	517.7	573.3
2011—2012	198.6	287.8	486.4
2012—2013	31.9	506.5	538.4
2013—2014	197.3	446.0	643.3
2014—2015	119.7	384.7	504.4
2015—2016	146.8	454.6	601.4
2016—2017	175.1	426.0	601.1
平均 Average	127.6	426.8	554.4

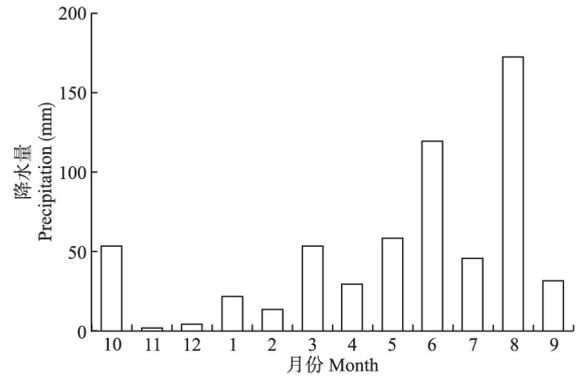


图1 2016—2017生长年月降水量分布

Fig.1 Monthly precipitation in 2016—2017 growing year.

1.2 试验设计

田间定位试验于2002年开始,之前是连续耕种的传统农田.供试作物为一年一熟春玉米,品种为‘先玉335’.试验区总面积1260 m²,共设置12个处理,各小区面积为5 m×7 m.种植方式为宽窄行种植,宽行60 cm,窄行30 cm.试验所用地膜为60 cm宽,0.015 mm厚的聚乙烯薄膜.本研究选取了6种不同保护性耕作处理措施(表2)均3次重复.地膜覆盖处理在播种前清除地膜并重新覆盖,地膜与秸秆均全年覆盖,无覆盖处理小区在休闲期为裸地.每个小区均施氮肥和磷肥作为基肥,氮肥为尿素(含N 46%) 150 kg·hm⁻²,磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 16%) 75 kg·hm⁻²,其中翻耕处理在玉米播种前撒施翻入土壤中,免耕处理于玉米播种前在两种种植行间开沟施入土壤中,玉米生长期间均不追肥.

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤硝态氮含量 在2017年9月底春玉米

表2 试验处理
Table 2 Experiment treatment

代码 Code	处理 Treatment	耕作管理 Tillage management
CT	传统耕作 Conventional tillage	仅在春玉米播种前人工翻耕一次,翻耕深度约为20 cm,无覆盖和灌溉
NT	连年免耕 No tillage	试验区连年免耕种植,无覆盖和灌溉
NB	免耕+生物炭 No tillage+biochar	在NT基础上,于2016和2017年连续在播种前每块小区表面撒入生物炭14 t·hm ⁻²
NS	免耕+秸秆覆盖 No tillage+straw mulching	在NT基础上,当季玉米收获后,将本小区收获的全部秸秆整秆均匀铺设(约7000 kg·hm ⁻²),玉米播种时秸秆收拢,放置行间
NF	免耕+地膜覆盖 No tillage + plastic film mulching	在NT基础上,覆盖地膜,膜上打孔种植,行间不覆膜,收获后全部玉米秸秆移走
NSF	免耕+秸秆+地膜覆盖 No tillage + straw + plastic film mulching	在NT基础上,地膜覆盖处理同NF,收获后玉米秸秆不移走,整秆铺设在地膜之间

收获期,于试验小区采集 0~300 cm 土壤剖面样品,在玉米两行种植间于 0~100 cm 层每 10 cm 深度取样,100~300 cm 层每 20 cm 深度取样,分别混合均匀,于通风阴凉处风干后,研磨过 0.25 mm 筛,以 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提,用 UV2300 紫外可见分光光度计测定土壤硝态氮含量。

1.3.2 土壤含水量 在试验小区利用 CNC503B 型中子水分仪于 2016 年 4—11 月和 2017 年 4—11 月每月底测定 0~300 cm 土壤剖面含水量。0~100 cm 土层按每 10 cm 记录读数一次,100~300 cm 土层按每 20 cm 记录读数一次。

1.3.3 作物生物量和产量 各试验小区在收获期随机收获 3 行,每行 10 株春玉米,选取长势均匀的 3 株玉米,在 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青后在 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量,测定生物量;收获的全部果穗脱粒,风干,称量计产。

1.4 土壤水分最大补给深度和消耗深度确定方法

选取 2016—2017 春玉米生长年土壤水分含量增加最大的水分分布曲线和季初的水分分布曲线比较,两条曲线交叉点即为最大补给深度,若无交叉说明水分补给深度超过测定的土壤深度;同理,选取土壤水分含量增加最大的水分分布曲线和降低最大的水分分布曲线比较,交叉点即为最大消耗深度,若无交叉即表明消耗深度超过测定深度。

1.5 数据计算与统计分析

1.5.1 水分利用效率计算 玉米生育期耗水量计算公式为:

$$ET = P + U - D - R + \Delta W \quad (1)$$

玉米水分利用效率公式为:

$$WUE = Y / ET \quad (2)$$

式中: ET 为玉米生育期耗水量 (mm); P 为玉米生育期降水量 (mm); U 为地下水上升补给量 (mm), 塬区地下水埋深在 80 m 以下, 无补给, $U=0$; D 为土壤水分渗漏量 (mm), Lysimeter 蒸渗仪多年监测结果无渗漏发生, $D=0$; R 为地表径流 (mm), 试验区地势平坦, $R=0$; ΔW 为 3 m 土壤剖面播种前与收获后贮水量之差 (mm); WUE 为水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); Y 为产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5.2 土壤硝态氮与含水量计算 土壤硝态氮累积量计算公式为:

$$A = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n h_i \times \rho_i \times C_i \quad (3)$$

土壤储水量计算公式为:

$$S = 10 \sum_{i=1}^n h_i \times \rho_i \times \theta_i \quad (4)$$

式中: A 为土壤硝态氮累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); h_i 为第 i 层土厚度 (cm); ρ_i 为第 i 层土容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为第 i 层土的硝态氮浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S 为土壤储水量 (mm); θ_i 为第 i 层土的质量含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。其中测定试验地 0~100、100~200 和 200~300 cm 土层土壤容重分别为 1.32、1.28 和 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行整理,采用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,以单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$), 利用 Origin 9.0 软件作图。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面水分补给和消耗深度

2016—2017 年降水量为 601.1 mm (表 1), 属平水年^[18]。土壤 0~300 cm 剖面连续观测的水分数据表明, 该生长年水分补给与消耗分 3 个阶段, 其中 2016 年 9 月至 2017 年 6 月是水分第一次补给时期, 2017 年 6 月至 8 月是水分消耗时期, 2017 年 8 月至 9 月是水分第二次补给时期。不同处理不同时期土壤剖面含水量变化存在差异 (图 2): 不同处理在水分两次补给后, 土壤含水量在剖面分别呈“S”形和“弓”形的分布并逐渐趋于稳定, 且水分补给后覆盖处理在 0~160 cm 以下深层含水量高于未覆盖处理; 水分消耗后, 各处理土壤含水量在剖面呈先减少后增大并逐渐趋于稳定的变化, 且不同处理间含水量基本一致。第一次水分补给时期, 各处理水分补给由表层至深层先增大后减少, 其中 CT 处理水分补给主要在 0~100 cm 土层, NT 处理主要在 0~200 cm 土层, NB、NS、NF 和 NSF 处理主要在 100~300 cm 土层, 比 NT 处理水分能向更深层补给; 而第二次水分补给时期, 各处理在整个剖面水分补给基本一致, 集中在 0~100 cm 土层, 并呈逐渐减小的趋势, 土壤水分会在下个生长年继续向土壤深层补给。水分消耗时期, 不同处理水分补给由表层向深层逐渐减少, 覆盖秸秆与地膜处理显著增加了 200 cm 以下水分的消耗, 表明覆盖处理能有效影响土壤深层水分变化。

不同处理土壤水分最大补给和最大消耗深度不同, 其中最大补给深度取两次补给深度较大一次的深度。CT 处理最大补给深度和消耗深度分别为 220 和 240 cm, 相较于翻耕处理, 免耕的最大补给和消耗深度更深, 都在 260 cm 以下, 其中 NS、NF 和 NSF

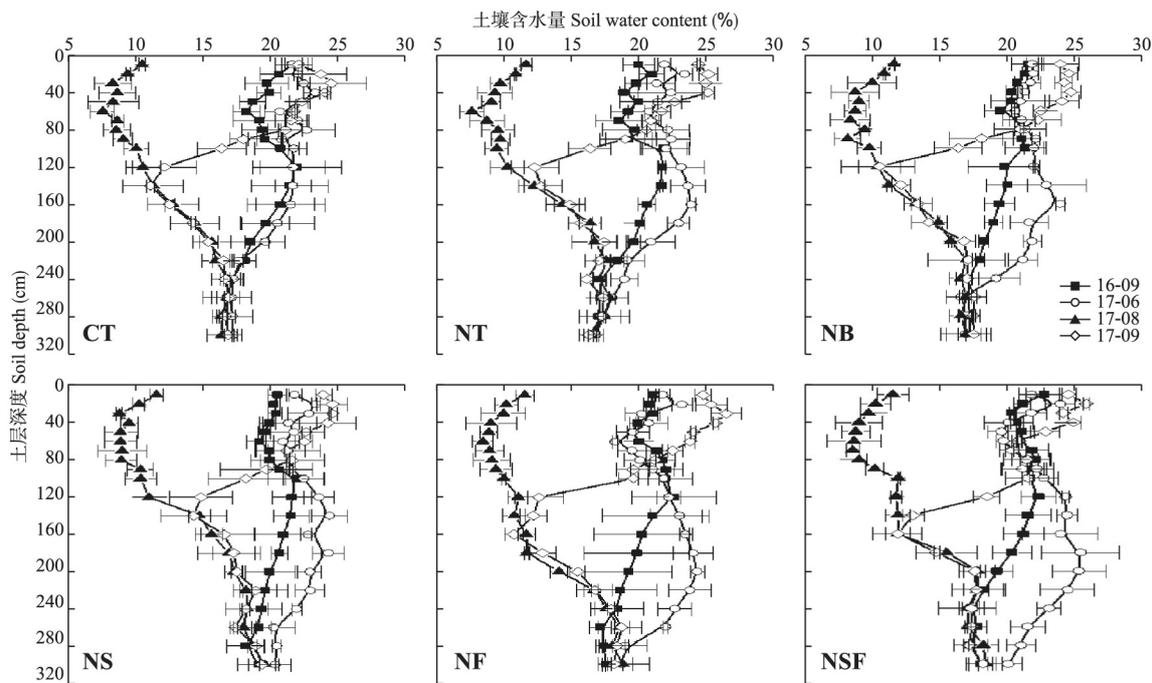


图 2 不同处理土壤剖面含水量
Fig.2 Soil profile water content in different treatments.

处理最大补给深度以及 NSF 处理最大消耗深度均超过 300 cm.设定土壤表层至某一深度土层水分的补给或消耗量占总补给或消耗量的 80% ,则该层为土壤水分主要补给或消耗深度 ,其中某一层的补给量为该层两次水分补给量之和 ,总补给量为两次补给量之和 ,以此计算主要补给深度.各处理主要补给和消耗深度都在 0~200 cm 范围 ,NB、NS、NF 和 NSF 较 NT 处理明显增加了主要水分补给深度 ,增加了 40~100 cm ,CT 和 NT 处理补给深度基本一致.在主要水分消耗方面 ,NF 和 NSF 较 NT 处理也明显增加耗水深度 ,增加了 40 cm ,其他处理与 NT 处理消耗深度基本一致(表 3).

2.2 土壤剖面水分补给量和消耗量

土壤剖面水分补给和消耗结果显示 ,不同管理

表 3 不同处理土壤水分补给和消耗深度
Table 3 Depths of soil water recharge and depletion in different treatments

处理 Treatment	补给深度 Recharge depth (cm)		消耗深度 Depletion depth (cm)	
	最大 Maximum	主要 Main	最大 Maximum	主要 Main
	CT	220	80	240
NT	260	100	260	140
NB	260	140	260	160
NS	>300	140	300	160
NF	>300	180	300	180
NSF	>300	200	>300	180

措施下 ,土壤水分补给和消耗量的差异达到显著水平(表 4).在第一次水分补给时期 ,CT 处理较 NT 在 0~100 cm 土层无显著差异 ,NS、NB、NSF 和 NF 水分补给量显著低于 NT 处理 ,分别低了 20.0%、65.1%、101.8% 和 115.3%; 在 100~200 和 200~300 cm 土层 ,CT 水分补给量显著低于 NT 处理 ,分别降低了 75.1% 和 78.8% ,而 NS、NF 和 NSF 较 NT 处理显著增加了水分补给量 ,分别是 NT 处理的 1.2 和 2.8、1.3 和 4.2、1.7 和 5.6 倍 ,NB 处理在 100~200 cm 土层水分补给量显著高于 NT ,是其 1.5 倍 ,但在 200~300 cm 土层较 NT 无显著差异.第二次水分补给时期 ,各处理较 NT 处理在 0~100 cm 土层无显著差异 ,而在 100~200 和 200~300 cm 土层虽有显著差异 ,但水分只有少量补给甚至是无补给.水分消耗时期 ,各处理与 NT 相比在 0~100 cm 土层无显著差异 ;但在 100~200 cm 土层 ,NF 和 NSF 较 NT 处理显著增加水分消耗量 ,分别提高了 22.5% 和 25.2% ,在 200~300 cm 土层 ,NB、NF、NS 和 NSF 处理水分消耗量较 NT 显著增加 ,分别增加了 1.7、2.6、3.3 和 5.4 倍.

比较各处理不同层次水分补给与消耗量发现 ,两次水分补给的土层深度不同 ,第一次水分补给时 ,CT 处理在 0~100 cm 土层补给量占整个剖面的 76.5% ,NB、NT 处理在 0~200 cm 土层补给量占整个剖面的 82.2% 和 84.8% ,NS、NSF 和 NF 处理在 100~300 cm 土层补给量分别占整个剖面的 73.9%、

表 4 不同处理土壤水分补给和消耗量

Table 4 Soil water recharge and depletion in different treatments

处理 Treatment	耗水前水分补给量 Water recharge before depletion (mm)			水分消耗量 Water depletion (mm)			耗水后水分补给量 Water recharge after depletion (mm)			生长年变化量 Water depletion in the growing year (mm)		
	0~ 100 cm	100~ 200 cm	200~ 300 cm	0~ 100 cm	100~ 200 cm	200~ 300 cm	0~ 100 cm	100~ 200 cm	200~ 300 cm	0~ 100 cm	100~ 200 cm	200~ 300 cm
CT	29.3± 2.5a	6.9± 4.1e	2.1± 0.4e	173.6± 12.2a	104.2± 14.0b	10.6± 0.8e	168.0± 10.8a	2.0± 0.8e	3.0± 0.9b	23.7± 3.8c	-95.2± 3.3c	-5.5± 0.7c
	27.5± 3.2a	27.7± 6.6d	9.9± 0.7d	163.0± 12.2ab	114.5± 10.0b	10.4± 0.6e	165.5± 17.0a	7.7± 1.2c	-5.7± 0.3e	30.0± 2.8ab	-79.0± 5.1b	-6.2± 0.4d
NB	9.6± 1.3c	40.9± 2.1b	10.9± 0.3d	159.6± 10.5ab	120.3± 17.6b	17.5± 2.3d	168.4± 19.7a	3.8± 0.4d	6.8± 0.8a	18.4± 2.3d	-75.5± 9.9b	0.2± 0.1a
	22.0± 1.1b	34.5± 4.3c	27.7± 3.3c	162.4± 12.7ab	109.3± 8.5b	34.6± 2.6b	168.1± 10.4a	12.7± 1.1b	0.1± 0.4c	27.8± 3.0b	-62.1± 9.7a	-6.8± 0.7d
NF	-4.2± 0.2e	36.2± 2.3c	41.8± 4.7b	146.9± 11.4b	140.3± 20.6a	27.3± 3.6c	182.3± 19.4a	11.7± 1.4b	0.6± 9.2c	31.3± 4.1a	-95.6± 9.3c	-5.5± 0.7c
	-0.5± 0.1d	48.3± 6.6a	55.7± 5.2a	153.4± 11.2ab	143.4± 12.4a	56.3± 5.1a	171.9± 19.5a	17.8± 1.7a	-2.1± 0.9d	18.8± 2.3d	-74.3± 10.3b	-2.8± 0.6b

将第一次水分补给时期的补给量称为耗水前水分补给量,第二次水分补给时期的补给量称为耗水后水分补给量,水分消耗时期的耗水量称为水分消耗量。The amount of recharge in the first stage was called water recharge before depletion, and the second stage was called water recharge after the depletion, the amount of depletion in water depletion stage was called water depletion. 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

100.5%和105.4%,这一时期水分主要是向土壤深层补给,且覆盖处理水分补给的更深;而第二次补给时,各处理水分90%以上均集中在0~100 cm土层,在经历了耗水时期后水分仅恢复到100 cm土层,在休闲期至生育前期进一步向深层补给。水分消耗过程中,各处理水分消耗主要集中在0~200 cm土层,其中NT、CT和NB处理95%以上水分消耗集中在0~200 cm土层,而NF、NS和NSF处理在0~200 cm土层水分消耗占整个剖面的90%左右,其能消耗更多深层的水分。经过整个生长年,各处理储水量在整个剖面表现出亏损的状况,其中水分在0~100 cm土层得到补充,而在100~200 cm土层出现亏损,200~300 cm土层无明显变化。

2.3 土壤剖面硝态氮分布

旱地长期连续施用氮肥会造成硝态氮在土壤中淋溶累积,春玉米连作15年后在收获期测定硝态氮含量,结果显示,不同处理影响硝态氮在0~300 cm土壤剖面的分布(图3),CT、NT和NS处理硝态氮在剖面大量累积并存在两个累积峰,其中CT处理硝态氮峰值分别在60和160 cm土层,峰值为11.2和20.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NT处理峰值在70和180 cm土层,峰值为7.6和6.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NS处理峰值在90和280 cm土层,峰值为3.0和5.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。CT处理在土壤剖面有更大的累积峰,是其他处理的2.7~3.7倍,而NS处理硝态氮累积峰更深,平均较CT和NT处理深100 cm,三者在整个剖面的硝态氮含量显著高于1.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮明显向下淋溶。NB、NSF和NF处理硝态氮在剖面无累积峰,其主要分

布在0~40 cm土层,并由表层向下逐渐减少,但NB处理在150 cm以下土壤剖面硝态氮逐渐增大,到200 cm硝态氮含量高于1.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,存在向下继续淋溶的风险。

2.4 土壤剖面硝态氮累积量

不同处理对土壤硝态氮累积量有显著影响(表5)。CT处理0~100和100~200 cm土层硝态氮累积量显著高于NT处理,分别是NT的1.3和4.0倍,其

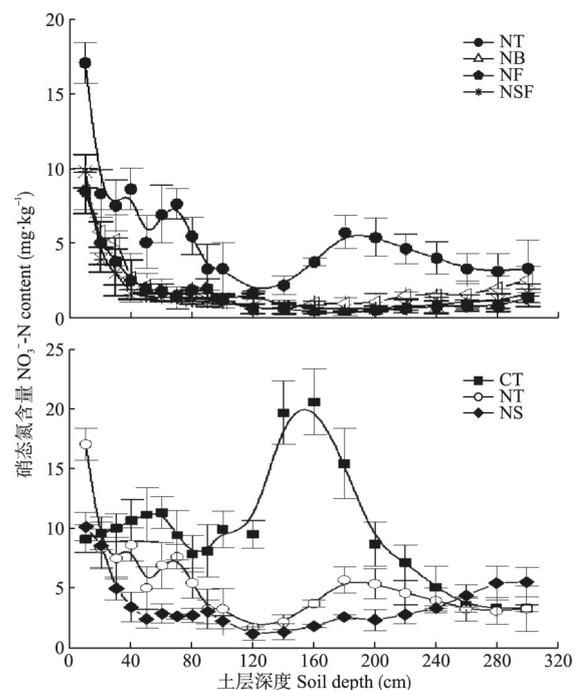


图3 不同处理土壤剖面硝态氮分布

Fig.3 Distribution of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in soil profile under different treatments.

他土层与 NT 处理无明显差异。在 0~40 cm 土层, NS、NB、NF 和 NSF 处理与 NT 相比,显著减少了硝态氮累积量,分别减少了 19.1、23.9、28.8 和 30.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 在 0~100 和 100~200 cm 土层,各处理硝态氮累积量差异与 0~40 cm 土层基本一致,与 NT 相比均显著减少了土壤硝态氮含量,分别减少了 41.5%和 50.7%、53.9%和 76.9%、59.6%和 88.7%、65.2%和 79.0%; 在 200~300 cm 土层,NB、NF 和 NSF 较 NT 处理也显著减少了硝态氮累积量,但 NS 处理较 NT 显著增加了硝态氮累积量。NB、NF 和 NSF 处理在 0~40 cm 土层硝态氮累积量占整个剖面的 40%以上,是硝态氮主要累积层,其中 NB 处理在 200~300 cm 土层累积量占整个剖面的 29.1%,表明其在深层也有一定累积; NS 在 0~100 和 200~300 cm 土层硝态氮累积量分别占整个剖面的 38.5%和 45.6%,是硝态氮主要累积层; NT 和 CT 处理硝态氮在整个剖面大量累积,其在 100~300 cm 土层硝态氮累积量分别占整个剖面的 49.4%和 65.9%。

2.5 作物农艺性状

不同处理对作物产量、生物量和水分利用效率有显著影响(表 6)。其中,CT、NB、NF 和 NSF 处理较 NT 玉米产量显著增加,分别增加了 18.0%、18.2%、

29.4%和 40.7%,而 NS 处理与 NT 无显著差异。NB、NF 和 NSF 处理较 NT 显著增加玉米生物量和水分利用效率,分别增加了 25.1%和 16.1%、29.6%和 21.7%及 39.4%和 29.4%,CT 和 NS 处理玉米生物量和水分利用效率较 NT 高,但未达显著水平,大小顺序为 NS<NT<CT。

3 讨论

3.1 不同保护性耕作措施对土壤硝态氮累积的影响

春玉米连续种植 15 年后,传统翻耕农田硝态氮在土壤中大量累积,免耕及免耕配合覆盖措施能显著减少其在土壤中的累积。相较于 NT,连续多年耕作后 CT 处理显著增加土壤剖面硝态氮累积的原因在于:翻耕对土壤的剧烈扰动破坏了土壤的良好结构,改善了耕层土壤的通气状况,较之免耕能使氮肥更好地混合于土壤中,加快了土壤有机质的矿化,使硝化作用增强,促进了土壤硝态氮的累积^[19],同时土壤翻耕后较大的土壤比表面和较短的弥散路径^[20],使硝态氮容易随水向下淋溶。本研究中,NT 在整个剖面的硝态氮含量均明显少于 CT 处理,硝态氮累积量较 CT 减少 49.3%,且 NT 处理 0~100 cm 土层硝态氮累积量占整个剖面的 50.6%,而 CT 占 34.1%,与 CT 相比减少了硝态氮向深层的淋溶累积。在免耕的基础上,施用生物炭能减少土壤硝态氮的淋溶累积,一方面是因为生物炭改善土壤的持水能力,同时能直接吸附土壤中氮素,从而显著减少硝态氮淋溶量^[21];另一方面,吸附的硝态氮在土壤中持续而缓慢的释放,相当于营养元素的缓释载体,可达到保肥的效果^[22],其对提高氮肥利用率和减少氮素损失意义重大。已有研究表明,长武黑垆土农田添加生物炭量越多,土壤溶质阻滞作用越强,相较于不添加生物炭,土壤硝态氮的淋溶损失量显著减少,黑钙土和紫色土区施用生物炭也大幅度降低土壤中硝态氮的淋失^[23]。本研究结果也显示,NB 在整个剖面硝态氮累积量显著低于 NT 处理,仅占其 41.0%。

在免耕处理基础上的覆盖地膜和秸秆也均能减少春玉米土壤硝态氮累积量。其中 NS 较 NT 能缓解硝态氮在 0~200 cm 剖面上的累积,但增加了深层硝态氮的累积,而 NF 和 NSF 土壤剖面无明显累积。首先,覆盖秸秆降解后营养元素可补充土壤养分^[24],生育初期的降温作用影响作物生长及对养分的吸收^[25],土壤中能累积一定的硝态氮;加之其能改善土壤结构,抑制土壤蒸发,增加降水入渗,具有

表 5 不同处理土壤硝态氮累积量

Table 5 Soil $\text{NO}_3^- \text{N}$ accumulation in different treatments ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treat- ment	土层 Soil layer (cm)			
	0~40	40~100	100~200	200~300
CT	51.9±7.1a	76.2±5.4a	189.1±20.3a	58.0±6.7ab
NT	54.7±6.3a	41.4±4.3b	47.1±5.8b	46.9±5.4b
NB	30.8±2.2bc	13.5±3.0cd	10.9±7.2c	22.7±3.0c
NS	35.6±2.0b	20.6±4.1c	23.2±3.3c	66.5±7.5a
NF	25.9±2.1bc	12.9±2.2cd	5.3±1.8c	10.4±2.5d
NSF	23.9±2.4c	9.5±0.8d	9.9±1.2c	13.3±1.1cd

表 6 不同处理玉米产量、生物量和水分利用效率

Table 6 Grain yield, biomass yield and water use efficiency of maize in different treatments

处理 Treat- ment	产量	生物量	水分利用效率
	Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	Biomass yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	WUE ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
CT	8933±600b	22862±3771b	18.6±1.5bc
NT	7569±785c	20683±2091b	18.0±1.2c
NB	8946±523b	25865±3510a	20.9±2.1ab
NS	7004±666c	20064±936b	16.9±1.0c
NF	9797±530ab	26800±2250a	21.9±2.3a
NSF	10649±709a	28835±2568a	23.3±1.4a

良好的保墒保水作用,能将更多的水储藏在土壤深层,使得硝态氮能随水向更深层累积^[26]。殷涛等^[26]的研究表明,覆盖秸秆 0~180 cm 土层储水量提高 8.7%,生育前期 0~10 cm 温度降低 1.3 °C。NF 处理改善了农田土壤理化性质,有效抑制土壤蒸发和减少水分无效消耗,增强深层土壤水分上升和利用,减少了硝态氮向下迁移的深度;其促进作物生长,加强了作物根系吸收硝态氮的能力,提高了水分和硝态氮利用率,迁移累积的硝态氮被作物根系吸收^[27],进一步减少硝态氮淋溶累积。Liu 等^[28]在黄土高原的研究表明,覆膜较不覆膜作物总氮累积量提高 44.6%,氮素利用率提高 55.2%,100~200 cm 土层硝态氮累积量减少 66.8%。NSF 即解决了前期低温造成的出苗慢和后期生长发育迟缓问题,同时平抑了后期土壤温度的过高增加,使作物生长始终在一个适宜的温度;有效增加水分补给的同时减少水分无效消耗,优化了土壤水肥热条件,更好地促进了作物生长和提高水分、养分利用效率^[26]。Gao 等^[29]的研究表明,相较于不覆盖处理,覆盖秸秆、地膜及秸秆地膜二元覆盖处理氮素利用率分别提高 26.8%、43.3%和 48.7%。本研究中 NS 处理 200~300 cm 土层硝态氮累积量占整个剖面的 45.6%,显著高于 NT 处理,硝态氮显著向深层淋溶损失;而 NF 和 NSF 处理硝态氮主要累积在 40 cm 土层,且整个剖面累积量分别只占 NT 处理的 28.7%和 29.8%。连年翻耕可造成硝态氮在土壤中大量累积,单纯的免耕措施虽能在一定程度上缓解这一趋势,但仍存在硝态氮的累积。配合生物炭、秸秆和地膜措施能进一步缓解硝态氮的淋溶累积,其中免耕结合秸秆地膜二元覆盖处理在土壤中硝态氮累积量少,缓解土壤硝态氮向下淋溶累积的效果更好,免耕秸秆地膜覆盖对提高旱作农田氮素利用率和减少氮素损失具有积极意义。

3.2 土壤水分运动与硝态氮累积的关系

硝态氮在土壤中的累积分布受土壤剖面硝态氮含量、作物根系吸收和水分垂直运动的影响^[30]。土壤硝态氮易溶于水,水分作为硝态氮运移的载体,其在土壤中的补给消耗过程与硝态氮淋溶累积状况密切相关。黄土旱塬雨养农业区降水分布不均且集中于 7—9 月,多年降水及补给消耗数据显示:春玉米生育期也是降水补给土壤水分的主要时期,休闲期降水量和强度远不及生育期,水分几乎不补给甚至发生消耗^[31],硝态氮的迁移和积累也可能主要发生在这一时期。研究显示,玉米水分在 6—8 月消耗,这

一时期是玉米快速生长耗水的时期;8 月至 9 月玉米成熟后耗水迅速减少,浅层消耗的水分得以大量补充;9 月至次年 6 月水分进一步由浅层向深层补给,这与王艳萍等^[31]的研究结果一致。黄土旱塬近 10 年春玉米农田土壤水分动态数据显示:水分消耗深度能达到 300 cm 左右,降水补给深度受降水年型的影响,如丰水年或强降雨月份补给深度超过 300 cm,而枯水年只有 200 cm 左右,但一般情况下水分补给深度在 200~300 cm,平水年水分即可得到恢复^[31-34],而遇丰水年或强降雨月硝态氮会进一步随水向更深层淋溶^[30]。土壤水分状况与作物根系对水分的利用有关,很大程度上影响硝态氮的淋溶累积。已有研究认为,渭北旱塬春玉米根系下扎深度超过 150 cm,且随土壤深度增加而明显降低,90%以上根系集中在 0~100 cm 土层,根系最深可到 200 cm,但主要以吸收水分为主^[35]。补给的水分在作物生长关键期被消耗,土壤 0~100 cm 层是春玉米根系主要耗水和养分吸收层,同时作物生育期蒸散量大于降水,深层水分得以向上补给,使得根系不断吸收土壤深层补给的水分,以供作物利用,耗水深度最大可达 200~300 cm^[33]。本研究中,2016—2017 年各处理水分最大补给消耗深度虽都在 300 cm 左右,但水分补给消耗过程主要集中在 0~200 cm,深层的水分变化小,这与前人研究结果一致^[33],可认为在土壤中硝态氮的淋溶累积主要发生在 0~200 cm 土层。两次水分补给时期,水分由浅层至深层逐渐补给,其中翻耕较免耕处理有更多的硝态氮随水分向土壤下层淋溶,覆盖处理较 NT 可向更深土层迁移硝态氮,而 NB 处理可减少硝态氮向下淋溶累积量。水分消耗时期,各处理间水分消耗的状况不同,玉米根系对土壤不同深度水分和硝态氮的利用影响硝态氮在土壤中的累积量和分布状况^[36]。不同处理对玉米的生长发育和耗水规律的影响最终可反映在水分利用效率和产量上,更高的生物量和水分利用效率一定程度上表明作物利用了更多的水分和硝态氮^[37],同时减少了硝态氮随水分进一步向深层淋溶的量。

就 NS、NT 和 CT 处理而言,作物根系吸收可减少 0~100 cm 土层硝态氮累积量,且本研究玉米生长年属平水年,年末 100~200 cm 土层水分被消耗,表明深层硝态氮可被利用,而如遇丰水年或强降雨月,硝态氮向更深层淋溶超过可被作物利用的深度,其会在深层累积而无法被利用,可认为 100~200 cm 土层是硝态氮淋溶累积的过渡层,由于降水年型不同,硝态氮运移经历根系吸收和深层渗漏交替进行

的过程,使得3个处理土壤硝态氮含量在剖面呈“弓”形分布的特点,其中CT处理有更多的硝态氮在深层累积,NS处理补给更多水分,但产量和水分利用效率最低,使得硝态氮向更深层淋溶。NSF和NF较NT消耗更多和更深层的硝态氮,降低了硝态氮淋溶深度,硝态氮主要累积在0~40 cm浅层,NB有利于作物对硝态氮的吸收利用,但发生深层渗漏的硝态氮很难被利用,有向下淋溶的风险。水分补给影响了硝态氮在土壤中的累积分布,而水分消耗限制其进一步向土壤深层淋溶,结合作物根系耗水及其对硝态氮的吸收,导致不同处理下土壤剖面硝态氮累积量和分布存在差异。因此,在旱作农田选取合理的管理措施能有效调控硝态氮在土壤中的淋溶累积,考虑不同处理对土壤水分条件和硝态氮淋溶累积的影响,单纯免耕处理较翻耕作用效果有限,且其未能促进作物生长和提高水分利用效率,而免耕基础上秸秆地膜覆盖效果最好,适宜于渭北旱塬春玉米种植。

结合笔者同期开展的小麦地研究结果^[38],单纯翻耕处理下渭北旱塬两种主要粮食作物的水分利用效率都较低,且易造成硝态氮在土壤中的大量淋溶累积,其中玉米地土壤硝态氮淋溶深度较小麦地土壤更深,可淋溶至300 cm的深层。免耕处理能在一定程度上减小土壤硝态氮淋溶累积,但并没有改善水分利用状况。在免耕基础上进行秸秆覆盖虽能改善农田土壤水分条件,但其并不能增加小麦和玉米的水分利用效率,最终导致减产,且良好的水分条件增加了硝态氮向土壤深层淋溶的风险,不利于养分的有效利用;而在免耕基础上添加生物炭或者进行地膜覆盖均能有效增加小麦和玉米对水分的利用效率,其中增施生物炭在两种作物中均减少了土壤硝态氮淋溶累积,而地膜覆盖在两种作物中控制硝态氮淋溶累积的效果更好,这两种措施均可用于改善旱塬农田两种主要粮食作物的水肥状况。但生物炭成本昂贵,并不适宜于大规模推广,适于小范围的土壤整治工程;塑料地膜虽成本低廉,但地膜残留导致的环境问题日益突出,应考虑用可降解地膜代替,同时可配合秸秆覆盖在黄土旱塬进行大面积推广。

4 结 论

硝态氮在土壤中的累积分布与土壤水分运动和作物根系吸收密切相关,不同处理影响土壤水分消耗补给和作物生长,使得硝态氮在土壤中的累积分布存在差异。连年免耕和传统翻耕处理硝态氮在整

个剖面都有累积分布,免耕秸秆覆盖主要累积分布在0~100和200~300 cm土层,3种处理硝态氮均会向深层淋失;而免耕配施生物炭、免耕地膜和免耕秸秆地膜覆盖土壤硝态氮主要分布在0~40 cm土层,其中前者存在向深层淋失的风险,而后两者无明显向深层淋失的趋势。保护性耕作措施均可以减少土壤硝态氮残留累积量,其中免耕秸秆地膜覆盖处理土壤0~300 cm剖面作物收获期硝态氮含量最低且无累积峰,且该处理能增加水分补给,减少硝态氮淋溶深度,改善作物生长,增加玉米产量,提高水分利用效率,是改善黄土塬区水肥状况、产投比较高的春玉米增产模式。

参考文献

- [1] Cai GX, Chen DL, Ding H, *et al.* Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 187-195
- [2] Wang Q, Li FR, Zhao L, *et al.* Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland. *Plant and Soil*, 2010, **337**: 325-339
- [3] Gao D-C (高德才), Zhang L (张蕾), Liu Q (刘强), *et al.* Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(6): 54-61 (in Chinese)
- [4] Shang J-X (尚金霞), Li J (李军), Jia Z-K (贾志宽), *et al.* Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei highland. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(13): 2668-2678 (in Chinese)
- [5] Fan Y-L (范亚宁), Li S-Q (李世清), Li S-X (李生秀). Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil NO_3^- -N in summer maize field in semi-humid area of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 799-806 (in Chinese)
- [6] Yu H-Y (余海英), Peng W-Y (彭文英), Ma X (马秀), *et al.* Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(1): 99-104 (in Chinese)
- [7] Wang B-S (王碧胜), Cai D-X (蔡典雄), Wu X-P (武雪萍), *et al.* Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1455-1464 (in Chinese)

- [8] Wang X-L (王宪良), Wang Q-J (王庆杰), Li H-W (李洪文), *et al.* Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2017, **48**(6): 168-175 (in Chinese)
- [9] Yin M-H (银敏华), Li Y-N (李援农), Chen P-P (陈朋朋), *et al.* Effect of no-tillage on maize yield in northern region of China: A meta-analysis. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2018, **51**(5): 843-854 (in Chinese)
- [10] Zhou LM, Jim SL, Liu CA, *et al.* Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agro-ecosystem. *Field Crops Research*, 2012, **126**: 181-188
- [11] Wang X-K (王秀康), Xing Y-Y (邢英英), Li Z-B (李占斌). Effect of mulching and nitrogen fertilizer on maize yield, distribution and fate of nitrogen in root layer. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49**(20): 3944-3957 (in Chinese)
- [12] Liu S-P (刘世平), Zhang H-C (张洪程), Dai Q-G (戴其根), *et al.* Effects of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 393-396 (in Chinese)
- [13] Tian X-X (田肖肖), Lyu S-Q (吕慎强), Zhang L (张亮), *et al.* No-tillage with straw mulching could increase grain yield, water and nitrogen use efficiencies of summer maize. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2017, **23**(3): 606-614 (in Chinese)
- [14] Lehmann J, Silva J, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 2003, **249**: 343-357
- [15] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 1719-1730
- [16] Reverchon FF, Licker RC, Yang H. Changes in $\delta^{15}\text{N}$ in a soil-plant system under different biochar feedstocks and application rate. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**: 275-283
- [17] Li H (李华), Wang Z-H (王朝辉), Li S-X (李生秀). Effect of different soil surface treatment on moisture and nitrate nitrogen accumulation and distribution in wheat field soil profiles in dryland. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(7): 1371-1377 (in Chinese)
- [18] Zhang B-Y (张北赢), Xu X-X (徐学选), Liu W-Z (刘文兆), *et al.* Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(6): 1234-1240 (in Chinese)
- [19] Zuber SM, Behnke GD, Nafziger ED, *et al.* Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois. *Agronomy Journal*, 2015, **107**: 971-978
- [20] Matthews AM, Armstrong AC, Leeds-Harrison PB. Development and testing of a model for predicting tillage effects on nitrate leaching from cracked clay soils. *Soil and Tillage Research*, 2000, **53**: 245-254
- [21] Sika MP, Hardie AG. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**: 113-119
- [22] Wang Y-Y (王艳阳), Wei Y-X (魏永霞), Sun J-P (孙继鹏), *et al.* Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(8): 113-119 (in Chinese)
- [23] Xiao Q (肖茜), Zhang H-P (张洪培), Shen Y-F (沈玉芳), *et al.* Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2015, **31**(16): 128-134 (in Chinese)
- [24] Yin X-F (尹晓芳), Tong Y-A (同延安), Zhang S-L (张树兰), *et al.* Nitrate leaching characteristics of wheat-corn rotation farmland in Guanzhong area of Shaanxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(3): 640-646 (in Chinese)
- [25] Wang M (王敏), Wang H-X (王海霞), Han Q-F (韩清芳), *et al.* Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(7): 1249-1258 (in Chinese)
- [26] Yin T (殷涛), He W-Q (何文清), Yan C-R (严昌荣), *et al.* Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(19): 78-87 (in Chinese)
- [27] Cai Z-C (蔡祖聪), Qin S-W (钦绳武). Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvial aquic soil in North China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(6): 885-891 (in Chinese)
- [28] Liu J, Zhan A, Chen H, *et al.* Response of nitrogen use efficiency and soil nitrate dynamics to soil mulching in dryland maize (*Zea mays* L.) fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, **101**: 271-283
- [29] Gao Y, Li Y, Zhang J, *et al.* Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **85**: 109-121
- [30] Zhang Y-M (张玉铭), Zhang J-B (张佳宝), Hu C-S (胡春胜), *et al.* Nitrate leaching in wheat-maize rotation field in the North China Plain. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(1): 17-25 (in Chinese)

- [31] Wang Y-P (王艳萍), Wang L (王力), Han X (韩雪), *et al.* Dynamics of soil moisture depletion and replenishment in different land use types of the Loess Tableland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(22): 7571-7579 (in Chinese)
- [32] Li W (李巍), Hao M-D (郝明德), Wang X-C (王学春). Depletion and restoration of soil water in different cultivating systems in gully region of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(3): 99-105 (in Chinese)
- [33] Han X-Y (韩晓阳), Liu W-Z (刘文兆), Chen L-P (程立平). Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(2): 430-438 (in Chinese)
- [34] Wang H, Zhang X, Yu X, *et al.* Maize-faba bean rotation under double ridge and furrows with plastic mulching alleviates soil water depletion. *Agricultural Water Management*, 2018, **207**: 59-66
- [35] Wu Y-C (吴永成), Zhou S-L (周顺利), Wang Z-M (王志敏), *et al.* Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(7): 1620-1625 (in Chinese)
- [36] Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). Effects of root uptake function and soil water on NO_3^- -N and NH_4^+ -N distribution. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(1): 96-101 (in Chinese)
- [37] Che S-G (车升国), Yuan L (袁亮), Li Y-T (李燕婷), *et al.* N uptake and yield response of wheat in main wheat production regions of China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2016, **22**(2): 287-295 (in Chinese)
- [38] Hu J-S (胡锦昇), Fan J (樊军), Fu W (付威), *et al.* Effect of different agricultural measures on soil water and NO_3^- -N leaching and accumulation in cropland of the Loess Plateau. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2019, **25**(2): 213-222 (in Chinese)

作者简介 胡锦昇,男,1994年生,硕士研究生.主要从事环境土壤物理研究. E-mail: hujinsheng16@mails.ucas.ac.cn

责任编辑 张凤丽

胡锦昇,樊军,付威,等. 保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1188-1198

Hu J-S, Fan J, Fu W, *et al.* Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^- -N leaching in dryland maize cropland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1188-1198 (in Chinese)