

不同管理措施对黄土塬区农田土壤水分调控 和硝态氮淋溶累积的影响

胡锦昇^{1,2}, 樊军^{1*}, 付威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:【目的】研究黄土区旱作农田不同施肥和覆盖处理对土壤水分与硝态氮淋溶的影响, 以提高水肥利用效率, 增加作物产量, 为选取适宜于该区可持续生产的农田管理措施提供理论基础。【方法】选取渭北旱塬定位试验中不施肥对照、施氮磷化肥、氮磷化肥配施钾肥、氮磷化肥配施生物炭、氮磷化肥与休闲期地膜全覆盖、氮磷化肥与生育期地膜全覆盖和氮磷化肥与全年地膜全覆盖共 7 个处理。分析了不同处理连续耕作冬小麦 15 年后收获期剖面硝态氮累积和生长季内土壤剖面水分变化状况。【结果】与对照相比, 施氮磷化肥处理显著增加了硝态氮在 0—300 cm 土层中的累积, 累积量是对照的 6.1 倍。与施氮磷化肥相比, 在氮磷化肥基础上生育期地膜全覆盖、配施生物炭、配施钾肥和全年地膜全覆盖处理显著减少了土壤硝态氮累积量, 分别减少了 78.7%、73.2%、66.0% 和 59.7%, 氮磷化肥与休闲期地膜全覆盖土壤硝态氮含量较施氮磷化肥处理虽无显著差异, 但硝态氮累积量也减少 19.2%。与对照相比, 施氮磷化肥处理对 0—300 cm 土层水分补给和消耗量无显著影响。与施氮磷化肥相比, 氮磷化肥基础上配施钾肥和生物炭对土壤水分补给和消耗量也无显著影响, 而施氮磷化肥基础上的休闲期地膜全覆盖、生育期地膜全覆盖和全年地膜全覆盖显著增加土壤水分补给量, 其中只有氮磷化肥与休闲期地膜全覆盖处理显著增加了土壤水分消耗量。硝态氮在土壤中的累积受土壤水分运移影响, 其在土壤中的累积量随着水分补给量的增加而增加。土壤水分运移能显著影响硝态氮在土壤剖面的分布, 其结果是氮磷化肥与生育期地膜全覆盖和氮磷化肥配施生物炭处理硝态氮主要分布在 0—20 cm 土层, 氮磷化肥配施钾肥和氮磷化肥与全年地膜全覆盖处理硝态氮主要分布在 0—100 cm 土层, 而施氮磷化肥和氮磷化肥与休闲期地膜全覆盖处理硝态氮主要分布在 0—200 cm 土层, 其中施氮磷化肥和氮磷化肥基础上配施钾肥、全年地膜全覆盖、休闲期地膜全覆盖 4 个处理出现硝态氮累积峰。【结论】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, 其中在施氮磷化肥的基础上增加生育期地膜全覆盖能有效调控土壤水分运移和减少硝态氮淋溶累积, 是旱塬区改善农田水肥状况, 增加作物产量的适宜措施。

关键词: 黄土塬区; 硝态氮; 水分运移; 生物炭; 地膜覆盖

Effect of different agricultural measures on soil water and NO_3^- -N leaching and accumulation in cropland of the Loess Plateau

HU Jin-sheng^{1,2}, FAN Jun^{1*}, FU Wei³, HAO Ming-de¹

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】Fertilization and plastic film mulching affect soil water and fertilizer use efficiencies, the NO_3^- -N leaching as well as winter wheat yields. This study compared the effects of different measurements to provide support to pursue suitable measures for sustainable development in the Loess Plateau. 【Methods】A

收稿日期: 2018-01-25 接受日期: 2018-04-03

基金项目: 中科院西部青年学者 A 类项目 (XAB2015A03); 国家自然科学基金项目 (41571224) 资助。

联系方式: 胡锦昇 E-mail: hujinsheng16@mails.ucas.ac.cn; * 通信作者 樊军 E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

winter wheat field experiment was conducted in the dryland in Weibei since 2002. Seven treatments were tested, i.e., no fertilization control (CK), N and P fertilization (NP), NPK fertilization (NPK), NP plus biochar (NPB), NP and full plastic film mulching in summer fallow period (NPFPT), NP and full plastic film mulching in growth period (NPFGT), and NP and full plastic-film mulching in a whole year (NPFWT). Plowing after harvests and before winter wheat sowing was performed in all seven treatments. Accumulation of soil NO_3^- -N at the winter wheat harvest stage for 15 years and soil water contents in the growing season were investigated.

【 Results 】 Compared with the CK, the NP significantly increased the accumulation of NO_3^- -N in 0–300 cm soil layers, which was 6.1 folds of the CK. Compared with the NP, the NPFGT, NPB, NPK and NPFWT significantly reduced soil NO_3^- -N accumulation by 78.7%, 73.2%, 66.0% and 59.7%, respectively. Although the soil NO_3^- -N accumulation of the NPFPT was not significantly different from that of NP, it also decreased by 19.2%. Compared with the CK, the NP had no significant effect on water recharge and depletion in 0–300 cm soil layers. Compared with the NP, the NPK and NPB had also no significant effect on water recharge and depletion in 0–300 cm soil layers, while the NPFPT, NPFGT and NPFWT significantly increased soil water recharge, of which the only NPFPT significantly increased soil water depletion. Nitrate accumulation in soil was affected by soil water movement, and its accumulation in soil increased with the increase of water recharge. Soil water movement significantly affected the distribution of NO_3^- -N in soil profile. The effect was that the NPFGT and NPB were mainly distributed in 0–20 cm soil layer, the NPK and NPFWT were mainly distributed in 0–100 cm soil layers, while the NP and NPFPT mainly distributed in 0–200 cm soil layer, of which the NPK, NPFWT, NPFPT and NP exhibited nitrate-nitrogen accumulation peaks. **【 Conclusions 】** Different agricultural cultivation measures could reduce the leaching of NO_3^- -N by controlling soil water content, and thus improve the nitrogen utilization efficiency. The NPFGT effectively reduced the leaching and accumulation of NO_3^- -N and regulated soil water movement, which was an appropriate measure for improving the condition of soil water and fertilizer, and increasing winter wheat yields in the dryland.

Key words: Loess Plateau; NO_3^- -N; water movement; biochar; plastic film mulching

氮肥利用率低在我国是一个较普遍的问题。统计认为,我国主要粮食作物的氮肥利用率为 27.5%,且呈下降的趋势^[1]。黄土高原是我国典型的旱作雨养农业区,农业生产面临的主要问题是降雨偏少且季节分布不均,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,增加氮肥的施用量虽能提高作物对水分和氮素的利用,增加作物产量^[2],但氮肥利用率随之降低,可能导致氮素严重残留和淋溶^[3]。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。研究表明,施用获得最大作物产量的氮肥量容易导致大量硝态氮淋溶累积^[4],相比于单施氮肥,氮磷化肥配施可促进作物生长和氮素吸收,是减少土壤硝态氮淋溶累积的有效措施^[5],但农田长期不合理施用氮磷化肥会破坏土壤结构、恶化农田土壤理化性质、降低作物产量,造成氮肥利用率降低^[6]。因此,实施氮磷化肥以外的管理措施促进作物对氮素吸收利用,减少硝态氮残留和淋溶及保证作物产量受到越来越多的关注。施

钾肥能促进作物对氮素的吸收,提高土壤水分利用效率,增加作物抗逆性,缓解土壤质量退化^[7-8]。华北潮土地区试验表明,长期施用氮磷化肥后作物产量下降,配施钾肥能提高氮素利用率,维持产量稳定^[9]。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^[10-11]。目前对生物炭输入后土壤硝态氮淋溶状况的研究并不多见,研究也主要集中于室内人工模拟试验^[12]。地膜覆盖能够改善土壤水热状况,加强微生物活性,促进土壤有机碳、氮的矿化,提高养分有效性^[13]。但甘肃定西大田试验显示地膜覆盖的增产作用在一定程度上是以耗竭土壤有机物质、养分和水分作为代价的,长期连续或全程覆膜不仅导致产量下降,而且也恶化了土壤生态,使土壤肥力下降,难以持续高产^[14]。改变连续长时间地膜覆盖方式,选取适宜的覆盖时期能缓解这一现状。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,不易被土壤胶体吸附,而随水淋溶,土壤水分状况及作物利用水分能影响其在土壤剖面中的累积

分布^[15]。为了探索有效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, 本文通过在渭北旱塬的定位试验, 研究在施氮磷化肥基础上, 配施钾肥、生物炭以及三种不同时期地膜覆盖措施对土壤水分运移和硝态氮淋溶的影响, 以期为黄土塬区旱地农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省长武县中国科学院院长武黄土高原农业生态试验站(107°40'E、35°12'N), 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。海拔 1200 m, 气候属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水 578.5 mm, 季节性分布不均, 降雨集中在 7—9 月份。冬小麦一个完整的生长年包括休闲期和生育期, 时间跨度在当年 7 月到次年 6 月, 其中 7 月至 9 月为休闲期, 10 月至次年 6 月为生育期。2008—2017 年冬小麦休闲期平均降水 332.7 mm, 生育期为 225.8 mm(表 1)。年均潜在蒸发量 1500 mm, 平均温度 9.1℃, 塬面大于等于 0℃ 活动积温 3688℃, 大于等于 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, 地下水位 50~80 m, 土壤容重 1.23~1.44 g/cm³, 剖面通透性好, 肥力中等。当地主要作物为冬小麦和春玉米, 冬小麦种植面积占粮食作物的 50% 以上。

表 1 2008—2017 年冬小麦休闲期与生育期降水量 (mm)
Table 1 Rainfall in summer fallow periods and growth periods of winter wheat 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	288.6	224.7	513.3
2008—2009	323.7	164.4	488.1
2009—2010	306.0	171.3	477.3
2010—2011	405.5	155.6	561.1
2011—2012	417.7	255.7	673.4
2012—2013	230.7	138.1	368.8
2013—2014	400.3	283.6	683.9
2014—2015	359.7	269.8	629.5
2015—2016	234.6	241.2	475.8
2016—2017	360.2	353.2	713.4
平均 Mean	332.7	225.8	558.5

1.2 试验设计

田间定位试验始于 2002 年, 之前是连续耕种的传统农田。供试作物为一年一熟冬小麦, 品种为‘长航 1 号’。试验区总面积 1260 m², 各小区采用随机区组设计, 面积为 35 m² (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。本研究选取了包括冬小麦不同施肥方式和不同覆膜时期共 7 个处理(表 2), 每个处理 3 次重复, 覆膜处理在翻耕时清除地膜, 翻耕后重新覆膜。试验使用的生物炭为杂木(杨树、枣树、槐树等)黑炭, 购置于当地商业公司, 该生物炭的基本理化性质: 容重 0.58 g/cm³, 颗粒组成 2~0.02 mm 占 86.29%, 0.02~0.002 mm 占 11.93%, 小于 0.002 mm 占 1.78%, pH 为 8.96, 阳离子交换量为 20.73 cmol/kg。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤硝态氮含量 在 2017 年 7 月冬小麦收获期, 于试验小区采集 0—300 cm 土壤剖面样品, 0—100 cm 每 10 cm 深度取样, 100—300 cm 每 20 cm 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 mol/L 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—9 月和 2017 年 4—11 月每月测定 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 各试验小区在收获期随机选取长势均匀的冬小麦 10 株, 105℃ 下杀青后在 80℃ 烘干至恒重, 测定生物量。

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 年冬小麦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, 无交叉即表明消耗超过测定深度。

1.5 数据计算与统计分析

1.5.1 土壤硝态氮与含水量计算 土壤硝态氮累积量计算公式为:

$$A = h \times \rho \times C \times 10/100$$

表 2 试验处理详情
Table 2 Experimental treatment details

代码 Code	处理 Treatment	耕作施肥管理 Tillage and fertilization management
CK	不施肥对照 No fertilizer	分别在冬小麦播种前和收获后耕翻, 深度约为 20 cm, 无覆盖 Plough before sowing and after harvesting of winter wheat at depth of 20 cm, without covering
NP	施氮磷化肥 N, P fertilizer	在 CK 基础上, 于播种前施入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 P ₂ O ₅ 16%) 75 kg/hm ² Based on CK, N (urea 150 kg/hm ²) and P (CaP ₂ H ₄ O ₆ 75 kg/hm ²) were basal applied before sowing
NPK	施氮磷钾化肥 N, P, K fertilizer	在 NP 基础上, 于播种前增施硫酸钾 (含 K ₂ O 50%) 30 kg/hm ² Based on N, P application, K ₂ SO ₄ 30 kg/hm ² was basal applied before sowing
NPB	NP + 生物炭 NP fertilizer+ biochar	在 NP 基础上, 于播种前增施生物炭 14 t/hm ² Based on N, P application, biochar of 14 t/hm ² was added before sowing
NPFFT	NP + 休闲期地膜全覆盖 NP + full plastic film mulching in fallow period	在 NP 基础上, 休闲期地膜全覆盖, 小麦播种前清除地膜 Based on N, P application, plastic film was mulched during whole fallow period, and removed before wheat sowing
NPFGT	NP + 生育期地膜全覆盖 NP + full plastic film mulching in growth period	在 NP 基础上, 覆膜播种小麦, 小麦收获后清除地膜 Based on N, P application, full plastic film was mulched during wheat growth period, and removed after wheat harvest
NPFWT	NP + 全年地膜全覆盖 NP + full plastic film mulching in a whole year	在 NP 基础上, 全年进行地膜全覆盖, 小麦全部在膜上打孔种植 Based on N, P application, plastic film was mulched around the year, wheat was sowed in the membrane drilling

土壤储水量计算公式为:

$$S = h \times \rho \times \theta_m \times 10$$

式中: A 为土壤硝态氮累积量 (kg/hm²); h 为土层厚度 (cm); ρ 为土壤容重 (g/cm³); C 为硝态氮浓度 (mg/kg); S 为土壤储水量 (mm); θ_m 为质量含水量 (g/kg)。其中土壤容重 0—100、100—200 和 200—300 cm 土层分别取 1.34、1.28 和 1.31 g/cm³[16]。

1.5.2 统计分析 试验数据处理使用 Microsoft Excel 2013, 处理间方差分析和多重比较使用 SPSS18.0, 绘图使用 Origin 9.0。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面水分补给与消耗深度

2016—2017 年降水量为 713.4 mm (表 1), 属丰水年[17]。0—300 cm 土壤剖面水分分布动态数据表明, 2016 年 6 月到 9 月是土壤水分的补给时期, 9 月到次年 6 月是土壤水分的消耗时期。不同处理不同时期 0—300 cm 土壤剖面含水量变化存在差异 (图 1): 不同处理 2016 年 6 月和 2017 年 6 月土壤水分消耗后, 其剖面含水量呈先减少后增大并逐渐趋于稳定的变化, 对照处理在整个剖面含水量都高于其他处理, 而其他处理剖面含水量基本一致; 2016 年 9 月土壤水分得到补给, 各处理剖面含水量随着深度增

加呈逐渐减少趋势, 其中覆膜处理土壤剖面含水量高于未覆膜处理。水分补给时期, CK 在整个剖面水分补给基本一致, 其他处理水分补给由表层向深层逐渐减少, NP、NPK、NPB 和 NPFGT 处理在 200 cm 深度以下基本无补给, 而 NPFFT 和 NPFWT 处理能向更深层补给; 水分消耗时期, CK 处理水分在 0—300 cm 土层减少幅度明显小于其他处理, 施肥与覆盖措施显著增加了剖面水分的消耗, NPFFT 和 NPFWT 处理深层水分的变化幅度更大。

不同处理影响了土壤水分最大补给和最大消耗深度, 在土壤水分补给时期, NPFGT 处理最大补给深度超过 300 cm, 其他处理最大补给深度都在 260—300 cm 之间。在土壤水分消耗时期, NPFGT 处理最大消耗深度最浅, 在 160 cm, 其他处理最大消耗深度均在 280—300 cm 之间。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。由此可见, CK 主要补给和消耗深度较 NP 处理大, 其他处理补给深度与 NP 基本一致; 但主要耗水深度存在差异, NPFGT 较 NP 处理减少 80 cm, NPFWT、NPK、NPB 和 NP 处理主要消耗深度一致, NPFFT 主要耗水深度明显大于 NP 处理, 增加了 40 cm (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的测定结果显示, 不

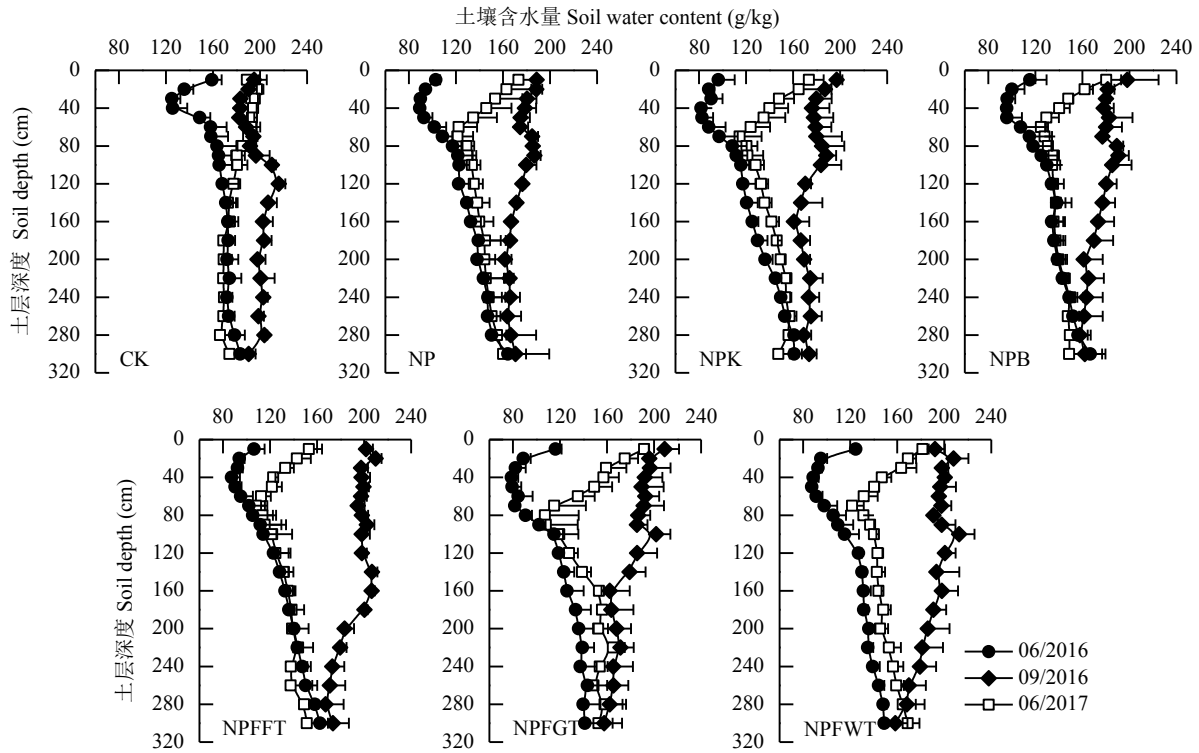


图 1 不同处理土壤剖面含水量

Fig. 1 Water contents in soil profiles under different treatments

表 3 不同处理土壤水分补给与消耗深度

Table 3 Depths of soil water recharge and depletion in different treatments

处理 Treatment	补给深度 (cm) Recharge depth		消耗深度 (cm) Depletion depth	
	最大 Max.	主要 Main	最大 Max.	主要 Main
CK	300	220	300	260
NP	300	160	300	180
NPK	280	160	280	180
NPB	260	160	280	180
NPFFT	280	180	280	220
NPFGT	>300	160	160	100
NPFWT	300	180	280	180

同管理措施下, 土壤水分补给和消耗量的差异达到显著水平(表 4)。在 0—300 cm 土层, CK、NPK、NPB 和 NP 处理补给量基本一致, NPFGT、NPFFT 和 NPFWT 补给量显著高于 NP 处理, 分别高 32.7%、43.1% 和 43.5%。NPFWT、NPB、NPFGT、NPK 和 CK 消耗量与 NP 处理无显著差异, 大小顺序为 NPFWT>NPB>NPFGT>NP>NPK>CK, NPFFT 消耗量显著高于 NP, 是 NP 处理的 2.0 倍。土层 0—100 cm 是冬小麦根系主要生长层, CK 土壤水分补给和

消耗量均显著小于 NP 处理, 其他处理较 NP 水分补给和消耗量的比较结果与 0—300 cm 土层的比较结果一致。比较各处理 0—100 cm 和 0—300 cm 土层年末补给量发现, 前者分别占后者的 53.1% (NPFGT)、61.3% (NPFWT)、79.5% (NPK)、79.9% (NP)、116.3% (NPB)、116.3% (CK) 和 136.5% (NPFFT)。这表明, NPK、NP、NPB、CK 和 NPFFT 处理年末水分补给集中在 0—100 cm 土层, 土壤水分的补充与消耗量在 100 cm 以下基本持平, 而 NPFGT 和 NPFWT 处理能向深层补给更多的水分。

2.3 土壤剖面硝态氮分布

长期连续施用氮肥会造成硝态氮在土壤中淋溶累积。冬小麦连作 15 年后, 在收获期土壤硝态氮含量的结果显示, 不同处理影响硝态氮在 0—300 cm 土壤剖面的分布(图 2), 各处理硝态氮含量最大值出现在 0—20 cm 表层土壤, 存在氮素表聚现象, CK 处理表层聚集的氮素主要来自大气沉降。CK、NPFGT 和 NPB 处理硝态氮由表层向下逐渐减少且无累积峰, 主要分布在 0—20 cm 土层, 100 cm 以下硝态氮浓度趋于稳定, 含量低于 1.0 mg/kg。NPK、NPFWT、NPFFT 和 NP 处理硝态氮也随表层向下逐渐减少, 但在 30 cm 土层以下开始增加并出现累积峰, 累积峰出现在 30—60 cm 土层间。NPK 处理 50—60

表 4 不同处理土壤水分补给与消耗量 (mm)

Table 4 Soil water recharge and depletion in different treatments

处理 Treatment	补给量 Recharge		消耗量 Depletion		年补给量 Year recharge	
	0—300 cm	0—100 cm	0—300 cm	0—100 cm	0—300 cm	0—100 cm
CK	145.3 ± 16.8 a	52.5 ± 7.4 a	100.0 ± 7.8 a	-0.2 ± 1.9 a	45.3	52.7
NP	172.1 ± 17.7 ab	104.7 ± 6.2 bc	110.8 ± 8.4 a	55.7 ± 3.4 b	61.3	49.0
NPK	176.6 ± 15.1 ab	116.9 ± 12.1 bcd	103.9 ± 10.7 a	59.1 ± 10.3 b	72.7	57.8
NPB	157.4 ± 12.3 ab	99.7 ± 10.6 b	121.1 ± 7.1 ab	57.5 ± 1.5 b	36.3	42.2
NPFFT	246.2 ± 8.5 c	134.5 ± 13.0 d	222.1 ± 23.0 c	101.6 ± 11.8 c	24.1	32.9
NPFGT	228.3 ± 25.9 c	130.6 ± 15.2 d	115.1 ± 7.9 ab	70.5 ± 6.5 b	113.2	60.1
NPFWT	247.0 ± 19.4 c	131.5 ± 3.9 d	147.5 ± 17.5 ab	70.5 ± 5.3 bc	99.5	61.0

注 (Note): 年末补给量=水分补给量-水分消耗量 Water recharge in growing year = Water recharge - Water depletion. 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.

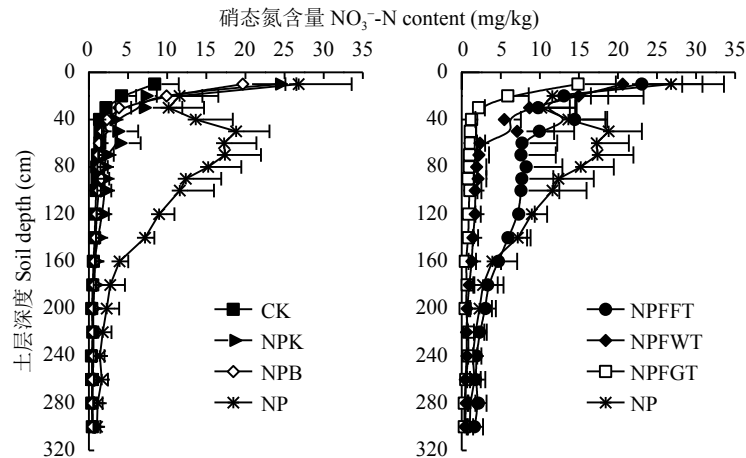


图 2 不同处理土壤剖面硝态氮分布

Fig. 2 Distribution of NO_3^- -N in soil profile under different treatments

cm 土层出现峰值, 峰值为 3.8 mg/kg; NPFWT 处理 40—50 cm 土层出现峰值, 峰值为 7.1 mg/kg; NPFFT 处理 30—40 cm 土层出现峰值, 峰值为 14.5 mg/kg; NP 处理 40—50 cm 土层出现峰值, 累积峰值最大达 18.8 mg/kg, 分别是其他三个处理的 1.3 (NPFFT)、2.6 (NPFWT) 和 4.9 (NPK) 倍。其中 NPK 和 NPFWT 处理硝态氮主要分布在 0—100 cm 土层, 100—300 cm 硝态氮含量低于 1.0 mg/kg, 趋于稳定; NPFFT 和 NP 处理硝态氮主要分布在 0—200 cm 土层, 200 cm 以下硝态氮含量也逐渐稳定, 但含量高于 1.0 mg/kg, 也显著高于其他处理, 硝态氮有向下淋溶的趋势。

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)。0—20 cm 土层 NP 处理显著高于 CK, 前者是后者的 3 倍, 其他处理与 NP 相比, 虽有不同程度降低, 但

均未达显著水平。在土壤 0—100 cm 剖面, NP 处理较 CK 显著增加了土层硝态氮累积量, 是 CK 的 6.7 倍, NPFWT、NPK、NPB 和 NPFGT 较 NP 处理显著减少了土壤硝态氮含量, 分别减少了 56.5%、63.3%、71.5% 和 80.5%, NPFFT 与 NP 处理无显著差异但减少了土壤硝态氮累积量, 减少了 61.2 kg/hm²。0—200 和 0—300 cm 土层各处理硝态氮累积量与 0—100 cm 基本一致, 除 NPFFT 外, 其他处理都较 NP 显著减少硝态氮累积量。在 0—20 cm 土层, NPFGT 和 NPB 处理硝态氮累积量占整个剖面 50% 以上, 是硝态氮主要累积层; 土壤 0—100 cm 剖面是 CK、NPK 和 NPFWT 处理硝态氮主要累积层, 硝态氮累积量占总累积量的 80% 左右; 而 NP 和 NPFFT 处理硝态氮主要累积层在 0—200 cm, 硝态氮累积量占总量的 80% 以上。

表 5 不同处理土壤硝态氮累积量 (kg/hm^2)
Table 5 Soil NO_3^- -N accumulation in different treatments

处理 Treatment	0—20 cm	0—100 cm	0—200 cm	0—300 cm
CK	16.9 ± 2.7 b	30.9 ± 2.9 c	38.6 ± 3.3 c	44.1 ± 4.0 c
NP	51.4 ± 8.7 a	207.6 ± 2.5 a	271.7 ± 22.0 a	289.8 ± 25.6 a
NPK	42.1 ± 5.2 ab	76.2 ± 6.1 bc	88.1 ± 14.3 bc	94.4 ± 10.7 c
NPB	39.6 ± 8.7 ab	59.2 ± 8.7 bc	69.0 ± 11.1 c	75.8 ± 12.4 c
NPFFT	48.5 ± 9.7 a	146.4 ± 17.0 ab	208.7 ± 26.3 ab	234.2 ± 22.6 ab
NPFGT	27.9 ± 6.5 ab	40.5 ± 5.4 c	49.1 ± 4.9 c	56.8 ± 4.2 c
NPFWT	47.7 ± 8.8 a	90.3 ± 9.1 bc	105.4 ± 13.1 bc	112.4 ± 18.9 bc

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.

3 讨论

3.1 不同管理措施对土壤硝态氮累积的影响

不同处理冬小麦连续 15 年种植过程中, 作物利用和损失使得不施肥农田土壤硝态氮含量越来越低, 施氮肥中只有 NP、NPFFT 和 NPFWT 处理在 0—300 cm 有明显的硝态氮累积并出现累积峰, 其他处理硝态氮累积不明显。相较于 NP 处理, 未覆地膜的 NPK 和 NPB 处理能显著降低土壤硝态氮累积量, 连续多年耕作后未在表层以下形成明显的累积层。原因在于钾肥能促进作物生长和对氮素的利用, 提高氮肥利用率, 增加根区和根区外硝态氮利用, 显著降低氮素盈余^[18]。同时还能增加水分利用率, 使得淋失风险明显减弱, 硝态氮向深层淋溶与累积减少^[7], 本研究中, NPK 处理硝态氮累积量显著低于 NP, 且主要在 0—100 cm 土层, 累积量达 76.2 kg/hm^2 , 占该处理 0—300 cm 土层总累积量的 80.7%。而 NP 处理 0—100 cm 土层硝态氮累积量为 207.6 kg/hm^2 , 只占总累积量的 71.6%。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的氮素从而显著减少硝态氮淋溶量^[19-20]; 另一方面, 生物炭减缓了吸附的硝态氮在土壤中的释放, 相当于营养元素的缓释载体, 可达到保肥的效果^[21], 有效地提高氮肥利用率和减少氮素损失。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^[22]。本研究结果也显示 NPB 硝态氮累积量显著低于 NP 处理, 在 0—20 cm 土层硝态氮累积量为 39.6 kg/hm^2 , 占到该处理总

累积量的 52.2%, 而 NP 仅为 51.4 kg/hm^2 , 只占其总累积量的 17.7%。且配施生物炭较增施钾肥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, 生物炭的施用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。

相较于 NP 处理, 不同覆膜时期处理均能减少冬小麦土壤硝态氮累积量, 其中 NPFFT 土壤剖面硝态氮累积量仅次于 NP 处理, 有明显的累积层, 而 NPFGT 处理土壤剖面硝态氮累积量是除 CK 外最低, 没有形成累积层。原因在于 NPFFT 处理在作物休闲期改善了土壤水热条件, 增加了有机氮矿化和被生物固定肥料氮的再矿化^[23], 这一时期累积的硝态氮在生育期也能因降水发生淋溶下移, 可造成硝态氮在土壤中大量淋溶累积, 李小刚等^[24]研究表明休闲期氮素矿化占到当季施氮量的 20%, 而覆膜较不覆膜氮素矿化增加 28%, 本研究中 NPFFT 处理硝态氮累积量分别是 NPFGT 和 NPFWT 处理的 4.1 和 2.1 倍。但累积量还是小于 NP 处理, 这是因为在休闲期覆膜一方面改善农田土壤理化性质, 促进作物吸收硝态氮; 另一方面 NPFFT 较 NP 处理耗水更深, 减少了硝态氮向下迁移的深度, 迁移累积的硝态氮被作物根系吸收^[23]。NPFGT 处理在休闲期能有效缓解氮素的矿化, 减少表层土壤中硝态氮含量, 在土壤水分恢复时避免大量硝态氮淋溶, 生育期覆膜后又能有效抑制土壤水分蒸发和减少水分无效消耗, 显著增加了土壤含水量, 改善冬小麦生长的水热条件, 促进根系生长^[9], 加强作物根系吸收硝态氮的能力, 进一步减少硝态氮淋溶累积, 周昌明等^[25]研究表明生育期覆膜作物氮素利用效率显著大于不覆盖, 本研究中 NPFGT 硝态氮累积量只有 NP 处理的 19.6%。NPFWT 处理虽在休闲期增加了硝态氮含量但在生育期为土

壤形成了良好的水热条件, 促进作物根系发育以更好地利用硝态氮, 累积量介于 NPFFT 和 NPFGT 处理之间, 只是在浅层 0—100 cm 有累积发生, 该层累积量占总的累积量的 80.3%。不同覆膜时期对土壤硝态氮淋溶累积的影响表明在作物生育期覆膜可有效地降低农田硝态氮的淋溶累积量。

3.2 土壤水分运移与硝态氮累积的关系

土壤硝态氮易溶于水, 水分作为硝态氮运移的载体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: 冬小麦连作休闲期是水分补给土壤的主要时期, 硝态氮的迁移和积累也可能主要发生在这一时期, 生育期降水量和强度虽不及休闲期, 但也占到全季的 41%, 表层浓度高的硝态氮会向下淋溶。研究显示 NP 处理土壤硝态氮主要累积在 0—200 cm, 其水分主要补给深度在 0—160 cm, 且土壤硝态氮累积量随着水分补给量的增加而增加 ($P < 0.01$) (图 3), 证实硝态氮在土壤中累积受土壤水分运移影响。长武黄土高原农业生态试验站近十年冬小麦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^[26-27], 而降水补给深度一般小于 300 cm, 且受降水年型的影响, 如丰水年或强降雨月份补给深度可达 300 cm 而枯水年只有 100 cm, 但一般而言水分补给深度在 200 cm 左右, 很少超过作物水分消耗最大深度, 硝态氮一般不会进一步随水向更深层淋溶^[28-29]。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冬小麦的根系下扎深度超过 200 cm, 92% 根系集中在 100 cm 以上且呈指数递减分布, 根系最深可达 300 cm^[30]。休闲期补给的水分在作物生育期被消耗, 0—100 cm 土层是冬小麦根系主

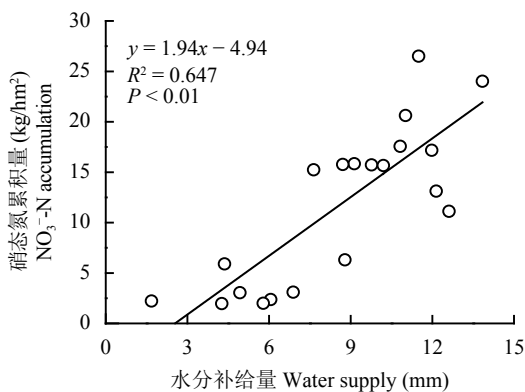


图 3 土壤水分补给量与硝态氮累积量的关系

Fig. 3 Relationship between water supply and NO₃-N accumulation

要耗水和养分吸收层, 同时作物生育期蒸散量大于降水, 使得根系不断从土壤深层吸收水分, 以补给作物利用, 耗水深度最大可达 200—300 cm^[31]。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, 可认为在土壤中硝态氮的淋溶累积主要发生在 0—200 cm, 且硝态氮淋溶累积量与水分补给量的变化一致, 都向下层逐渐减少。水分补给时期, 覆膜较未覆膜增加了水分补给量, 硝态氮随水分向土壤下层淋溶增多, 其中 NPFFT 和 NPFWT 处理增加了土壤氮素矿化量^[32], 能向下淋溶更多的硝态氮。水分消耗时期, 各处理间水分消耗的状况不同, 小麦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^[33]。研究认为覆膜可减少水分无效消耗、增加作物蒸腾耗水, 使水分消耗由物理过程向生理过程转化, 提高水分利用效率^[34]。当季作物生物量表明, NPFGT 和 NPFWT 处理生物量显著大于 NP 处理, 其他处理虽无显著差异但较 NP 处理均能增加生物量 (图 4), 更高的生物量一定程度上表明作物利用了更多的水分和硝态氮^[35], 同时减少了硝态氮随水分进一步向深层淋溶。在不同处理中, NPFFT 处理土壤硝态氮累积多而利用少, 与 NP 处理都在 0—200 cm 大量累积; NPFWT 和 NPFGT 处理消耗大量硝态氮, NPFWT 累积主要在 0—100 cm, 而 NPFGT 少量硝态氮主要集中在 0—20 cm; NPK、NPB 与 NP 处理水分补给基本一致, NPB 较 NPK 更有利于作物对硝态氮吸收利用, 硝态氮主要累积于 0—20 cm, 而 NPK 在 0—100 cm

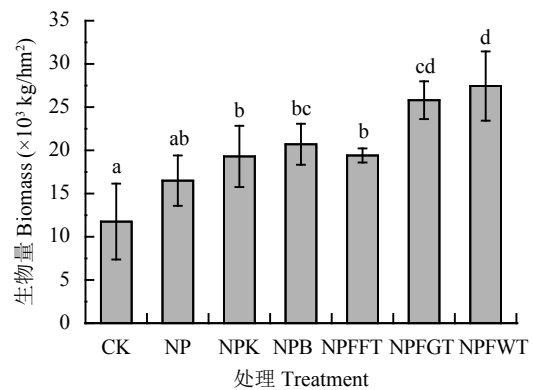


图 4 2016—2017 年不同处理冬小麦生物量

Fig. 4 Winter wheat biomass in different treatments during 2016-2017

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Different letters above the bars mean significant differences among treatments at the 0.05 level.]

累积。水分补给影响了硝态氮在土壤中累积分布, 而水分消耗限制其进一步向土壤深层淋溶, 配合作物根系耗水及其对硝态氮吸收, 其结果是不同处理下土壤剖面硝态氮累积量和深度存在差异。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, 施氮磷化肥基础上生育期地膜全覆盖效果最好, 适宜于渭北旱塬冬小麦种植区采用。

4 结论

硝态氮在土壤中的累积分布与土壤水分运移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, 其中施氮磷化肥和施氮磷化肥与休闲期地膜全覆盖处理硝态氮累积分布在 0—200 cm 土层, 施氮磷化肥配施钾肥和全年地膜全覆盖处理硝态氮主要分布在 0—100 cm 土层, 而施氮磷化肥配施生物炭和生育期地膜全覆盖处理硝态氮少量分布于 0—20 cm 土层。在氮磷化肥配施的基础上, 增施钾肥、生物炭和覆膜均可以减少土壤硝态氮残留累积量。施氮磷化肥基础上生育期地膜全覆盖处理土壤 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, 增加生物量, 是改善黄土塬区水肥状况, 产投比较高的冬小麦增产模式。

参考文献:

- [1] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54–61.
Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54–61.
- [2] 王小纯, 王晓航, 熊淑萍, 等. 不同供氮水平下小麦品种的氮效率差异及其氮代谢特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2569–2579.
Wang X C, Wang X H, Xiong S P, *et al.* Differences in nitrogen efficiency and nitrogen metabolism of wheat varieties under different nitrogen levels[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2569–2579.
- [3] 李强, 王朝辉, 戴健, 等. 氮肥调控与地表覆盖对旱地冬小麦氮素吸收及残留淋失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(7): 1380–1389.
Li Q, Wang Z H, Dai J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer regulation and soil surface mulching on nitrogen use by winter wheat and its residue and leaching in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1380–1389.
- [4] Run W R, Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1995, 8(7): 827–834.
- [5] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 NO_3^- -N累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 397–403.
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, *et al.* Effect of phosphate application on soil nitrate-nitrogen accumulation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 397–403.
- [6] Jaynes D B, Dinnes D L, Meek D W, *et al.* Using the late spring nitrate test to reduce nitrate loss within a watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 669–677.
- [7] 陈培元, 蒋永罗, 李英, 等. 钾对小麦生长发育、抗旱性和某些生理特性的影响[J]. *作物学报*, 1987, 13(4): 322–328.
Chen P Y, Jiang Y L, Li Y, *et al.* Effect of potassium on wheat growth, drought resistance and some physiological properties under different soil moisture conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1987, 13(4): 322–328.
- [8] Manna M C, Swarup A, Wanjarri R H, *et al.* Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 397–409.
- [9] 蔡祖聪, 蒋绳武. 华北潮土长时间试验中作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 885–891.
Cai Z C, Qin S W. Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvial aquic soil in North China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 885–891.
- [10] 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[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [11] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [12] Reverchon F F, Licker R C, Yang H, *et al.* Changes in $\delta^{15}\text{N}$ in a soil-plant system under different biochar feed stocks and application rate[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(2): 275–283.
- [13] Zhou L M, Jim S L, Liu C A, *et al.* Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2012, 126(1): 181–188.
- [14] 李世清, 李凤民, 宋秋华, 王俊. 半干旱地区不同地膜覆盖时期对土壤氮素有效性的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1519–1526.
Li S Q, Li F M, Song Q H, Wang J. Effects ability of plastic film mulching periods on the soil nitrogen availability in semiarid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1519–1526.
- [15] 李华, 王朝辉, 李生秀. 旱地小麦地表覆盖对土壤水分硝态氮累积分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1371–1377.
Li H, Wang Z H, Li S X. Effect of different soil surface treatment on moisture and nitrate nitrogen accumulation and distribution in wheat field soil profiles in dryland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1371–1377.
- [16] 王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 550–554.
Wang R, Liu W Z, Li Z. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in Loess Tableland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 550–554.

- [17] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 陈天林. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234–1240.
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z, Chen T L. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234–1240.
- [18] 邹铁祥, 戴廷波, 姜东, 等. 钾素水平对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质形成的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 686–692.
Zou T X, Dai T B, Jiang D, *et al.* Potassium supply affected plant nitrogen accumulation and translocation and grain protein formation in winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 686–692.
- [19] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 711–716.
Zhang Y G, Liu H B, Li Z H, *et al.* Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 711–716.
- [20] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 113–119.
- [21] 王艳丽, 魏永霞, 孙继鹏, 张雨凤. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113–119.
Wang Y Y, Wei Y X, Sun J P, Zhang Y F. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 113–119.
- [22] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 李世清. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128–134.
Xiao Q, Zhang H P, Shen Y F, Li S Q. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 128–134.
- [23] 高亚军, 李云, 李生秀, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2901–2910.
Gao Y J, Li Y, Li S X, *et al.* Effect of different soil surface treatment on moisture and nitrate nitrogen accumulation and distribution in wheat field soil profiles in dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2901–2910.
- [24] 李小刚, 李凤民. 旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4630–4638.
Li X G, Li F M. Soil organic carbon balance and nitrogen cycling in plastic film mulched croplands in rainfed farming systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4630–4638.
- [25] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 133–142.
Zhou C M, Li Y N, Gu X B, *et al.* Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 133–142.
- [26] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱地农田土壤水分剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 411–416.
Wang B, Liu W Z, Dang T H, *et al.* Distribution features of soil water content in the profile of rainfed cropland with long-term fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 411–416.
- [27] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50–54.
Huang M B, Tang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the Loess Plateau on soil water cycle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 50–54.
- [28] 李巍, 郝明德, 王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 99–105.
Li W, Hao M D, Wang X C. Depletion and restoration of soil water in different cultivating systems in Gully Region of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 99–105.
- [29] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, *et al.* Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133–1138.
- [30] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96–101.
Song H X, Li S X. Effects of root uptake function and soil water on NO_3^- -N and NH_4^+ -N distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1): 96–101.
- [31] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 430–438.
Han X Y, Liu W Z, Chen L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 430–438.
- [32] Zhang H, Liu Q, Yu X, *et al.* Effects of plastic mulch duration on nitrogen mineralization and leaching in peanut (*Arachis hypogaea*) cultivated land in the Yimeng Mountainous Area, China[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2012, 158: 164–171.
- [33] 尹飞, 王俊忠, 孙笑梅, 李洪岐. 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2166–2178.
Yin F, Wang J Z, Sun X M, Li H Q. Response of spatial concordance index between maize root and soil nitrate distribution to water and nitrogen treatments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2166–2178.
- [34] 李儒, 崔荣美, 贾志宽, 等. 不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3312–3322.
Li R, Cui R M, Jia Z C, *et al.* Effects of different furrow-ridge mulching ways on soil moisture and water use efficiency of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16): 3312–3322.
- [35] 车升国, 袁亮, 李燕婷, 等. 我国主要麦区小麦氮素吸收及其产量效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 287–295.
Che S G, Yuan L, Li Y T, *et al.* N uptake and yield response of wheat in main wheat production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 287–295.