

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 等. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 124-133.

ZHANG Hao-qing, YU Xin-yang, ZHAI Bing-nian, et al. Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in Weibei dry-land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 124-133.

渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青^{1,2}, 于昕阳^{1,2}, 翟丙年^{1,2*}, 金忠宇^{1,2}, 马 臣^{1,2}, 王朝辉^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了探讨陕西渭北旱地冬小麦有机无机配施的减氮效应及机理,于2011年10月至2014年6月在陕西省渭南市白水进行了连续三年的田间小区定位试验,探究不同氮肥用量(0、75、150、225、300 kg N·hm⁻²)与有机肥(猪粪 30 t·hm⁻²)配施对冬小麦产量、氮肥利用率(NUE)、土壤硝态氮残留及土壤养分的影响,明确当地最适宜的有机无机配施比例。结果表明:有机无机配施处理的产量、地上部吸氮量和 NUE 较单施化肥处理分别提高 6.9%、29.3%和 34.3%,且以有机肥与 150 kg N·hm⁻² 氮肥配施处理效果最佳;有机无机配施显著改善 0~20 cm 土壤养分状况,土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量分别较单施化肥处理提高 6.1%、8.2%、90.4%和 94.8%,但当施氮量大于 150 kg N·hm⁻² 时,配施有机肥显著增加 0~200 cm 硝态氮残留量(43.7~188.8 kg·hm⁻²),加大硝态氮淋溶风险;有机肥分别与 75、150 kg N·hm⁻² 氮肥配施相比单独施用 150、225 kg N·hm⁻² 氮肥处理在产量上无显著差异,却显著提高了 NUE(27.4%和 45.3%),并降低 60 cm 土层以下硝态氮含量。综合上述研究结果,在渭北旱地冬小麦生产中,在有机肥(猪粪)30 t·hm⁻² 的基础上配施 75~150 kg N·hm⁻² 的氮肥(有机氮:无机氮=1:0.46~0.91),可以保证小麦高产优质,并降低氮素淋溶风险。

关键词:旱地;冬小麦;有机肥;产量;氮肥利用率;硝态氮残留;土壤有机质

中图分类号:S512 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)01-0124-10 doi:10.11654/jaes.2016-0827

Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in Weibei dryland

ZHANG Hao-qing^{1,2}, YU Xin-yang^{1,2}, ZHAI Bing-nian^{1,2*}, JIN Zhong-yu^{1,2}, MA Chen^{1,2}, WANG Zhao-hui^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the effect and mechanism of manure on reducing nitrogen(N) fertilizer rates in Weibei dryland, a 3-year field experiment was conducted to investigate the effects of manure and N fertilizer on winter wheat yield, N use efficiency(NUE), soil nitrate-N residue and soil nutrients in Baishui County. Following a split-plot design, the main treatments included two manure application rates: 30 t·hm⁻² (with manure, +M), and 0 t·hm⁻² (without manure, -M); The sub-treatments included five N fertilizer rates: 0, 75, 150, 225 and 300 kg N·hm⁻². The results showed that, additional manure increased winter wheat yield by 6.9%, aboveground N uptake by 29.3%, and NUE by 34.4%, relative to that without manure, and the highest values were all recorded in the M+N150 treatment (the combination of manure with 150 kg N·hm⁻² fertilizer). The combined application of manure and inorganic fertilizer increased soil organic matter, total N, available P and available K in 0~20 cm layer by a mean of 6.1%, 8.2%, 90.4%, 94.8%, compared to that without manure, respectively. However, when manure was combined with the N rate which exceeded 150 kg N·hm⁻², further increase of N rate would lead to an increase of soil nitrate-N residue (43.7~188.8 kg·hm⁻²), and the risk of nitrate-N leaching. The combination of manure with 75 and 150 kg N·hm⁻² N fertilizer resulted in a comparable grain yield with that for applying 150 and 225 kg N·hm⁻² fertilizer alone, but increased NUE significantly (The improve-

收稿日期: 2016-06-20

作者简介: 张昊青(1993—),女,宁夏银川人,硕士研究生,主要从事旱地水肥管理研究。E-mail: haoqingzhang@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者: 翟丙年 E-mail: bingnianzhaitg@126.com

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B04);公益性行业(农业)科研专项(201503124);国家小麦现代产业技术体系建设专项(Z225020803)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD23B04); The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China(201503124); The Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System(Z225020803)

ment was 27.4% and 45.3%, respectively), and additionally reduced the soil nitrate-N below 60 cm layer. As a result, we concluded that combining manure (30 t·hm⁻² pig manure) with 75~150 kg N·hm⁻² N fertilizer (organic N: inorganic N=1: 0.46~0.91) is recommended for achieving an N efficient and environmental friendly winter wheat farming system in Weibei dryland.

Keywords: dryland; winter wheat; manure; grain yield; N use efficiency; soil nitrate-N residue; soil organic matter

渭北旱塬是我国粮食主产区之一,也是以小麦生产为主的古老旱作区^[1]。长期以来,该地区冬小麦平均产量偏低,仅为 3473 kg·hm⁻²,相比全国平均产量低 26.3%,且年际间产量变化较大,整体呈现低而不稳的态势^[2]。为追求高产,当地农民形成了“高产就要多施肥”的施肥习惯,小麦生产中过量施肥(尤其是氮肥)的现象十分普遍。调查结果显示,渭北旱塬有超过 60% 的小麦种植户存在过量施氮的现象^[3],不仅造成极大的资源浪费,而且导致氮肥利用率降低^[4]、土壤及作物质量下降,同时造成硝酸盐累积,温室气体排放,以及地表水、地下水污染^[5-6]等一系列环境问题。

近年来,为实现我国到 2020 年化肥用量零增长的战略目标,有机替代技术已成为减少化肥用量的重要措施之一。许多研究表明,有机肥的投入可促进微生物对无机氮的固定,在减少氮肥用量的情况下,能提高氮素利用效率,同时增加土壤有机质含量,并进一步改善土壤性质,从而促进作物增产稳产^[7-9]。Bhattacharyya 等^[10]在印度研究发现,有机无机配施处理较单施化肥处理小麦增产 27%,土壤有机碳、全氮、速效磷含量分别提高 10%、42%和 71%;Liu 等^[11]在我国甘肃的长期定位试验中发现,有机无机配施较单施化肥处理显著提高土壤 pH、微生物活性以及脲酶、碱性磷酸酶、β-葡萄糖苷酶等酶活性;Abbasi 等^[12]在巴基斯坦的研究发现,以 25%的禽畜粪肥代替化肥可以在不减产的情况下,显著提高小麦各器官吸氮量,将氮肥利用率提高近 25%。渭北旱塬生态环境特殊,旱和薄紧密相连,在此特殊的环境下探明有机无机配施对培肥改土、增产增效的作用,对当地减量施用化肥、改善农业生态环境、实现农业可持续发展具有十分重要的意义。

虽然有关有机无机配施对冬小麦产量、水肥利用效率及土壤养分的研究已有很多^[13-15],但是,由于有机肥当季提供的养分量,特别是氮素,难以准确计算,过去大部分研究只是简单设计有机肥和化肥不同用量组合,通过田间试验直接筛选二者配比,有些尽管设计等氮量,但由于很难精准估算有机肥当季提供的氮素养分量,很可能过高或过低估算了有机肥料提供的

氮量,而致使化学氮肥用量不足或过量。巨晓棠等^[16]研究表明,向农田中投入的氮素越多,土壤中氮素残留量和氮损失量也越多,从而加剧环境污染。通过切实有效的途径,找出有机肥替代化肥氮的替代比例,才是实现减氮增效、环境友好的真正目标。因此,本研究以渭北当地冬小麦品种晋麦-47 为研究对象,在前人和本研究团队多年工作的基础上,在确定较为合理的有机肥用量的前提下,设置系列氮肥的用量,形成多个有机无机配施比例,通过三年的连续定位试验,旨在探明:(1)有机肥与不同用量的氮肥配施对冬小麦产量、氮素吸收、土壤养分以及土壤硝态氮累积的影响;(2)有机肥替代部分氮肥的可行性;(3)在不加剧土壤硝态氮残留和淋失风险的前提下,通过数学拟合的方法找出可同时实现小麦高产高效和土壤培肥的最佳有机无机配比,为该地区冬小麦生产及土壤培肥提供科学依据,为实现我国化肥零增长战略目标进行有益探索。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011—2014 年在陕西省渭南市白水县(109°58'E, 35°18'N)进行。该地区位于渭北旱塬,海拔 696 m,年平均气温 11.4℃,属于暖温带半湿润易旱气候区,多年平均降水量 577.8 mm,绝大多数麦田无灌溉措施,为雨养农田。供试土壤为黄绵土,黄土母质,容重为 1.3 g·kg⁻¹。土壤肥力中等,试验前表层 0~20 cm 土壤 pH 8.1、有机质含量为 14.4 g·kg⁻¹、全氮为 0.8 g·kg⁻¹、速效磷为 9.2 mg·kg⁻¹、速效钾为 177.2 mg·kg⁻¹。该试验开始于 2011 年 10 月,经过 3 年的连续试验,有机肥的增产增效作用逐渐显著,故本文涉及的内容为 2014 年 6 月冬小麦收获后的试验结果。试验年度全年降雨量为 541 mm,其中小麦生育期 243 mm,夏闲期 298 mm。

1.2 试验设计与实施

试验采用裂区设计,主处理为施有机肥(+M)和不施有机肥(-M),副处理为 5 个施氮水平,分别为 0、75、150、225、300 kg N·hm⁻²(N0、N75、N150、N225、N300),

共 10 个处理。其中施有机肥的各处理是将有机肥与不同用量的氮肥混合撒施(有机肥为猪粪,用量和养分含量见表 1,折合纯氮 $164\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$, 当季矿化 $43\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$),不施有机肥的各处理按照试验用量单独施用化肥。因此,配施有机肥各处理总施氮量(按照有机肥矿化氮量计算)分别为 43、118、193、268、343 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,不施有机肥各处理施氮量为 0、75、150、225、300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同时,每个处理均增施磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)作为肥底,用量分别为 90 $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 60 $\text{kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。所有肥料施用完毕后,用旋耕机旋耕 20 cm,将肥料翻入土中,再进行小麦播种。各处理的氮肥均分两次施用,70%在播前撒施,其余 30%在拔节期结合降雨追施。

各试验小区 6 m×10 m,重复 4 次,在田间随机排列。小麦品种为晋麦 47,采用机械播种,播种量为 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,常规平作,不起垄,行宽 20 cm。小麦生育期无灌溉,收获后夏休闲,田间管理与当地农户一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品

在试验开始前(2011 年 9 月)于整个试验地 S 型选取 10 个点,采集 0~20 cm 土壤样品用于土壤基础肥力分析。在进行 3 季试验后(2014 年 6 月上旬小麦收获后),于每小区随机选取 3 个点,采集 0~20 cm 层土壤样品,同一小区的样品混合,密封带回实验室。自然风干后分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,以进行土壤养分分析。土壤有机质含量采用油浴加热-重铬酸钾容量法测定;全氮含量采用浓硫酸消煮-半微量开氏法测定;速效磷含量采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠溶液浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸钠溶液浸提-火焰光度法测定。

同时,在 2014 年小麦收获后采集 0~200 cm 的土壤样品供土壤水分和硝态氮含量测定。每小区用直径为 4 cm 的土钻随机采集 3 个点,每 20 cm 为一层,同一层的样品剔除作物根系后混匀,密封带回实验室。土壤含水率采用烘干法(105 ℃下烘 24 h)测定。土壤硝态氮采用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提(土水比为 1:10;振荡 1 h),连续流动分析仪(AA3)测定。

1.3.2 植物样品

在 2014 年冬小麦收获期采集植物样品。在各试验小区随机选取 3 个 1 m×2 m 代表性样方,贴地表收割地上部分。同一小区的所有样方样品混合,晾晒,风干后称量地上部生物量并脱粒计产。同时,在每个小区内随机选取 3 个 1 m 长的样段,将每个样段的小麦植株连根拔起,当场剪掉根系。同一小区各个样段混合,作为该小区的一个植物分析样品。将每个小区的地上部分植物样品分为茎叶和穗两部分,风干脱粒,并保留颖壳。各器官烘干粉碎后,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,半微量凯氏定氮法测定其中的全氮含量。

1.4 数据处理

籽粒吸氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=籽粒含氮量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)×籽粒产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/1000

秸秆吸氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=茎叶含氮量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)×茎叶干质量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/1000

植株地上部吸氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=植株地上部含氮量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)×地上部生物量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/1000

氮素利用效率(%)=[施氮区地上部吸氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-对照区地上部吸氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]/施氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)×100

土壤硝态氮残留量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=Σ 土层厚度(cm)×土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)×土壤硝态氮含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/10

数据和图表处理采用 Excel 2013 及 SPSS(19.0)软件进行统计分析。采用裂区设计的方差分析检验有机肥和氮水平的效应,采用单因素方差分析检验所有 10 个处理间的差异显著性。多重比较采用 Duncan 法,差异显著性水平为 5%。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对冬小麦产量及产量构成因素的影响

试验结果见表 2。连续 3 年有机无机配施可显著增加冬小麦产量,相比不施肥处理平均增产 18.9%,相比单施化肥处理平均增产 6.9%。分析产量构成要素可知,有效穗数的增加是增产的直接原因。配施有机肥相比不施肥处理有效穗数增加 22.3%,相比单施化肥处理增加 12.1%,而对千粒质量和穗粒数的影响

表 1 试验有机肥的水分和养分含量
Table 1 Water and nutrient contents of manure

施用量(鲜质量)/t·hm ⁻²	含水率/%	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹
30	23	7.6	253.9	7.1	10.6	12.4

表 2 不同施肥处理对冬小麦产量及其构成因素的影响
Table 2 Effect of different fertilization practices on yield and yield components of winter wheat

有机肥	氮水平	产量/kg·hm ⁻²	有效穗数/10 ⁴ ·hm ⁻²	千粒质量/g	穗粒数
- M	N0	3805d	197e	48a	40a
	N75	4247bc	205de	49a	39a
	N150	4474bc	223bcd	48a	42a
	N225	4529bc	237bc	47a	41a
	N300	4103cd	213cde	47a	41a
+ M	N0	4215bcd	228bcd	48a	39a
	N75	4628ab	232bc	49a	41a
	N150	4728a	262a	47a	41a
	N225	4623ab	245ab	47a	42a
	N300	4424abc	239ab	47a	42a
效应分析					
有机肥	- M	4232B	215B	48A	41A
	+ M	4523A	241A	48A	41A
氮水平	N0	4010C	213B	48A	40A
	N75	4438AB	219B	49A	40A
	N150	4601A	242A	48A	42A
	N225	4576A	241A	47A	42A
	N300	4263BC	226B	47A	42A

注:大写字母表示各变量在有机肥及氮水平处理间的差异显著性,小写字母表示各变量在 10 个处理间的差异显著性;不同字母表示各处理之间差异达到 5% 的显著性水平。下同。

Note: Different lowercase(one-way ANOVA) and uppercase(two-way ANOVA) letters indicate significant differences between treatments at the 5% level. The same below.

不显著。

无论是否配施有机肥,产量和有效穗数均随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的趋势。在单施化肥的各处理中,N225 可达到产量和穗数的最大值,在配施有机肥的各处理中,有机肥与 150 kg N·hm⁻² 氮肥配施(M+N150)时达到最大值,与不施肥处理相比,产量、有效穗数分别增加 24.3%和 33.0%;与相同施氮量下单施化肥处理(N150)相比,分别增加 5.7%和 17.5%;与单施 225 kg N·hm⁻² 氮肥(N225)相比,分别增加 4.4%和 10.5%。

另外,M+N75、M+N150 处理与单独施用 150、225 kg N·hm⁻² 化肥处理相比小麦产量差异不显著,且有增加的趋势。说明在配施有机肥的条件下适当减少氮肥用量不会造成小麦减产。

小麦产量随施氮量的变化情况见图 1。将小麦产量与施氮量进行回归分析发现,二者之间呈显著的抛物线关系(图 1)。其回归方程(有机无机配施:

$y = -0.018 2x^2 + 5.997 3x + 4 236.8, R^2 = 0.971 1$; 单施化肥: $y = -0.024 2x^2 + 8.439 2x + 3 783.4, R^2 = 0.974 4$)表明,在单施化肥的情况下,当施氮量为 174 kg·hm⁻² 时,达到理论产量最高值 4519 kg·hm⁻²;在有机无机肥配施的情况下,当施氮量为 164 kg·hm⁻² 时,有机无机肥配施处理产量达到 4731 kg·hm⁻²。说明有机无机肥配施相比单施化肥处理可以在减少 5.7%氮肥用量的条件下,获得 4.7%的增产效果。

2.2 不同施肥处理对冬小麦地上部吸氮量和氮肥利用效率(NUE)的影响

由表 3 可知,单独施用有机肥和不施肥处理对冬小麦各器官氮素吸收量均无显著促进作用。随着配施氮肥用量的增加,冬小麦秸秆、籽粒和地上部总吸氮量呈现出先增加后减少的趋势,最大值均出现在 M+N150 处理:与不施肥处理相比,冬小麦秸秆、籽粒和地上部吸氮量分别增加 110.1%、50.9%、57.4%;与相同氮肥用量下单施化肥处理相比,分别增加 39.7%、16.1%、19.0%。总体来看,有机无机肥配施较单施化肥处理冬小麦籽粒吸氮量提高 9.9%,地上部总吸氮量提高 29.3%。

同时,有机无机肥配施较单施化肥处理显著提高冬小麦 NUE(34.3%)。当有机肥与 150 kg N·hm⁻² 氮肥配施时 NUE 最大,较相同施氮量下单施化肥处理提高 65.8%。另外,M+N75、M+N150 处理的 NUE 较单独施用 150、225 kg N·hm⁻² 化肥处理相比分别提升 27.4%和 45.3%,说明在配施有机肥的情况下减量施用氮肥可显著提高 NUE。但是,当施氮量大于 150 kg

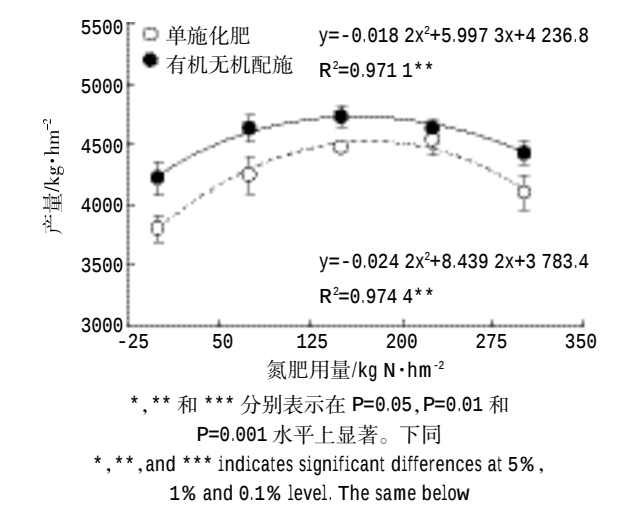


图 1 氮肥用量对冬小麦产量的影响
Figure 1 Effect of different N application rates on winter wheat yield

表 3 不同施肥处理对冬小麦植株吸氮量和氮肥利用效率的影响
Table 3 Effect of different fertilization practices on N uptake and N use efficiency(NUE) of winter wheat

有机肥	氮水平	秸秆吸氮量/ kg·hm ⁻²	籽粒吸氮量/ kg·hm ⁻²	地上部总吸氮 量/kg·hm ⁻²	氮肥 利用率 NUE/%
-M	N0	11.9d	96.7d	108.6f	—
	N75	16.1bcd	112.8bcd	128.9def	27.2b
	N150	17.9bcd	125.7abc	143.6bcd	23.4bc
	N225	21.6abc	135.0ab	156.6abc	21.4bc
	N300	17.8bcd	112.1bcd	129.9def	7.1c
+M	N0	11.6d	101.2d	112.8ef	—
	N75	16.4bcd	120.7abc	137.1cde	32.4a
	N150	25.0a	145.9a	170.9a	38.8a
	N225	23.8ab	145.0a	168.8ab	24.9bc
	N300	16.5d	127.2bcd	143.7bcd	10.3c
效应分析					
有机肥	-M	17.1A	116.5B	113.5B	19.8B
	+M	18.7A	128.0A	146.7A	26.6A
氮水平	N0	11.8B	99.0B	110.7C	—
	N75	16.3AB	116.8AB	133.0B	29.8A
	N150	21.5A	135.8A	157.3A	31.1A
	N225	22.7A	140.0A	162.7A	23.1B
	N300	17.2AB	119.7AB	136.8B	8.7C

N·hm⁻²时,配施有机肥会造成 NUE 的显著降低。

2.3 不同施肥处理对收获后土壤残留硝态氮累积及剖面分布的影响

经过 3 年的连续种植,2014 年冬小麦收获后,土壤残留硝态氮在 0~200 cm 土层中大量累积,且与氮肥用量呈极显著的抛物线关系,结果见图 2。

由图 2 可知,有机无机配施与单施化肥处理 0~200 cm 土层硝态氮累积量的差异在施氮量超过 150 kg N·hm⁻²时达到显著水平,且随着施氮量的增加,差异更加显著。当氮肥用量为 150 kg N·hm⁻²和 225 kg N·hm⁻²时,配施有机肥处理 0~200 cm 土层土壤硝态氮累积量比单施化肥处理分别多 43.7 kg·hm⁻²和 111.3 kg·hm⁻²,而当氮肥用量为 300 kg N·hm⁻²时,这一数值提升到 188.8 kg·hm⁻²。

2014 年冬小麦收获后 0~200 cm 土层土壤残留硝态氮的剖面分布状况见图 3。

由图 3 可知,经过 3 年连续种植,不施肥处理中土壤硝态氮的累积量很少,0~200 cm 土层的累积量仅为 79.6 kg·hm⁻²,且在整个 0~200 cm 土层剖面无明显累积峰。当施氮量≤75 kg N·hm⁻²时,配施有机肥仅显著增加 0~60 cm 土层硝态氮含量,60 cm 以下

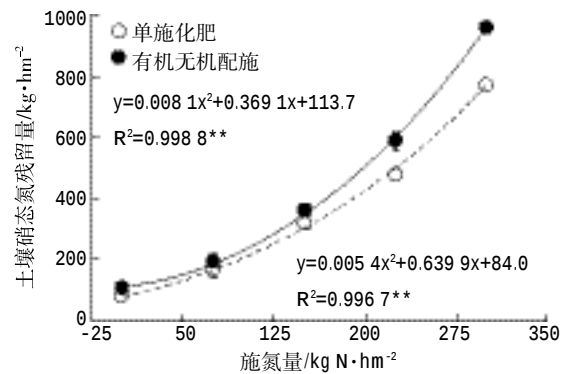


图 2 氮肥用量对小麦收获后 0~200 cm 土层土壤硝态氮累积的影响

Figure 2 Effects of different N application rates on NO₃-N accumulation in 0~200 cm soil layer

土层与化肥单施处理差异不显著,且无硝态氮累积峰出现。同样,当施氮量为 150 kg N·hm⁻²时,配施有机肥仅在 0~100 cm 土层增加土壤硝态氮含量,100 cm 以下土层无累积峰。但是,随着施氮量的增加,配施有机肥所造成的淋溶风险也越大。当氮肥用量大于 150 kg N·hm⁻²时,有机无机肥配施处理和单施化肥处理土壤硝态氮均出现向 2 m 以下更深层的土壤淋失的趋势;当氮肥用量为 225 kg N·hm⁻²时,有机无机肥配施处理不仅显著增加 0~100 cm 土层硝态氮含量,在 180 cm 以下土层,土壤硝态氮含量也显著高于单施化肥处理;当氮肥用量为 300 kg N·hm⁻²时,有机无机配施处理的硝态氮含量几乎在整个 0~200 cm 土层剖面均显著高于单施化肥,200 cm 土层硝态氮浓度超过 29.0 mg·kg⁻¹,极易发生淋失,污染地下水。

但是,将 M+N75、M+N150 处理的小麦收获后土壤残留硝态氮剖面分布分别与单独施用 150、225 kg N·hm⁻²化肥处理相比,可以发现,M+N75、M+N150 处理硝态氮含量在 0~60 cm 土层与 N150 和 N225 处理变化相似,但显著降低了 60 cm 以下土壤硝态氮含量,减少了硝态氮淋失的风险(图 4)。

2.4 不同施肥处理对土壤养分的影响

经过 3 年的连续试验,总体来看,有机无机肥配施处理显著提高了土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量(表 4),与不施肥处理相比分别增加 13.8%、28.8%、71.6%、53.8%,与单施化肥处理相比分别增加 6.1%、8.2%、90.4%、94.8%。单独施用有机肥土壤的有机质和全氮含量较试验前均有所提高,分别增加 0.2、0.05 g·kg⁻¹,平均每年增加 0.07、0.02 g·kg⁻¹;较不施肥处理分别增加 5.8%和 18.1%。随着施氮量的增

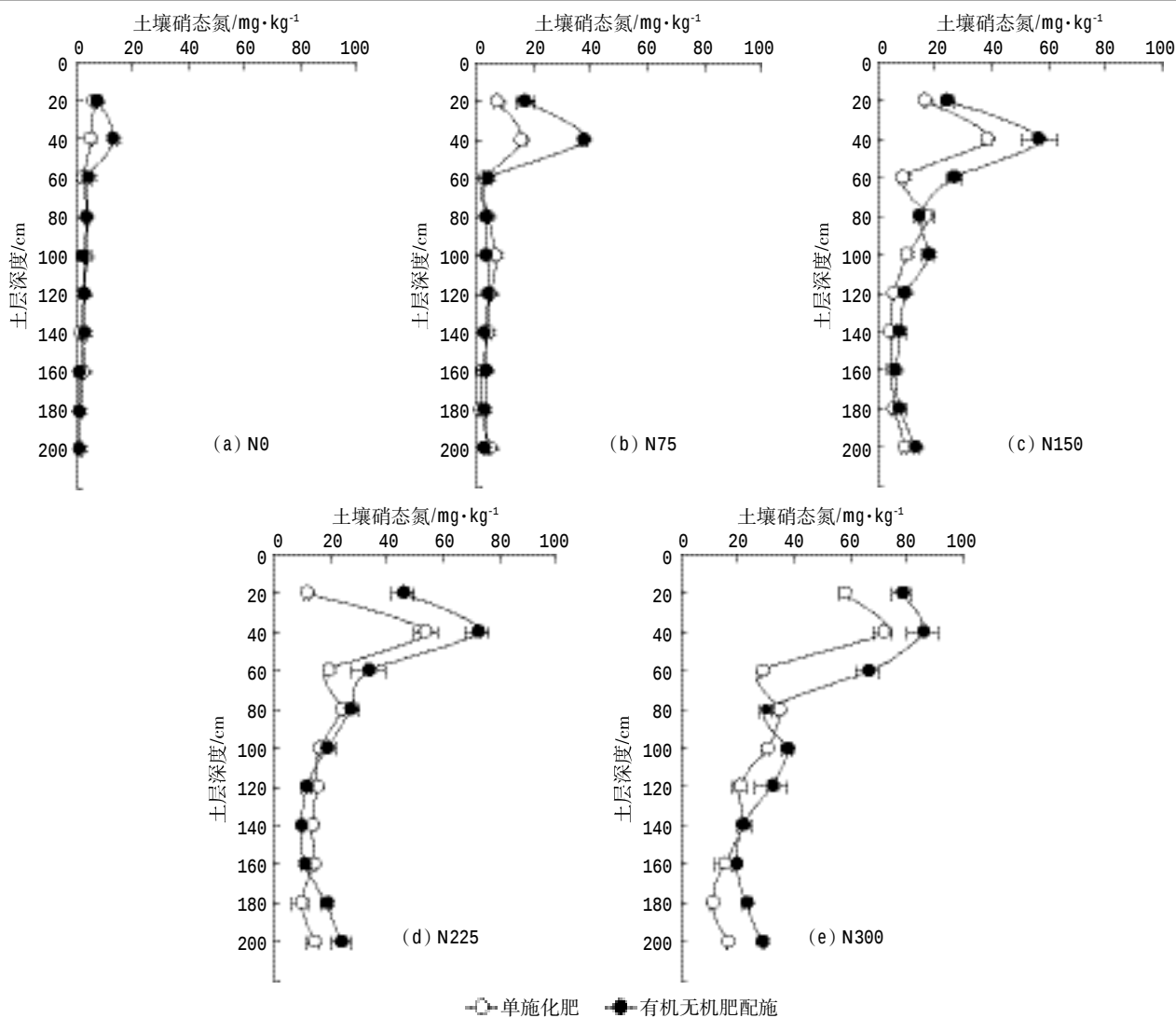


图 3 冬小麦收获后 0~200 cm 土层土壤硝态氮分布图

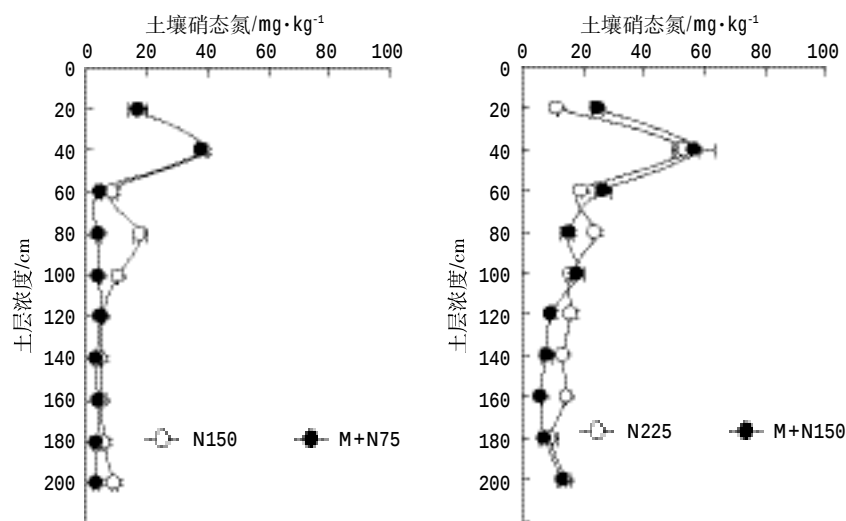
Figure 3 Soil $\text{NO}_3\text{-N}$ distribution in 0~200 cm layers after winter wheat harvest

图 4 氮肥减量与有机肥配施对 0~200 cm 土层土壤硝态氮剖面分布的影响

Figure 4 Effect of reduced N application rate on $\text{NO}_3\text{-N}$ content in 0~200 cm soil profiles

加,土壤有机质和全氮含量均呈现先上升后趋于稳定的趋势,最大值出现在 M+N150 处理,较试验前分别增加 1.9、0.15 g·kg⁻¹, 平均每年增加 0.63、0.05 g·kg⁻¹; 较不施肥处理分别增加 18.1%和31.9%; 较单独施用 150 kg N·hm⁻² 氮肥处理分别增加 7.9%和 8.0%。有机肥与各施用水平的氮肥配施都显著提高了土壤速效磷、速效钾含量,总体上较单施化肥处理增加近 1 倍。然而,无论是否配施有机肥,土壤速效磷、速效钾的最高值均出现在不施氮处理,随着施氮量的增加,土壤速效磷、速效钾含量均呈现逐渐降低、之后趋于稳定的趋势。

3 讨论

3.1 冬小麦产量和产量构成要素

有机无机肥配施条件下,当季施入的化肥可保证作物生产的需求,而有机物料的投入也有助于保持土壤肥力的稳步提高^[17]。许多研究表明,有机无机肥配施可显著增加小麦产量^[18-20]。在本研究中,有机无机肥配施处理较单施化肥处理平均增产 6.8%, 且在施氮 150 kg N·hm⁻² 时达到显著水平,与前人的报道一致^[21]。也有研究表明,在施用一定量氮肥(150 kg N·hm⁻²)的

基础上配施有机肥,未达到显著的增产效果^[22]。这可能与土壤质地、肥力及生态条件等多方面因素有关。本试验点位于渭北旱塬,有机质含量低,微生物活动强,施入的氮肥很容易通过硝化-反硝化过程损失^[16]。有机肥可以保证作物在生育后期“不脱肥”,从而显著提高产量。

分析产量构成要素发现,不同施氮水平下配施有机肥对小麦穗粒数和千粒重均无显著影响,而公顷穗数较单施化肥处理平均增加 12.1%,说明公顷穗数的增加是有机肥增产的直接原因。这可能是因为有机无机配施能显著提升小麦分蘖数,增加成穗率,进而提高公顷穗数^[23]。随着施氮量的增加,有机无机配施条件下的公顷穗数与小麦产量的变化趋势一致,均呈现先增加后降低的趋势。可能是由于有机肥的 C/N 一般高于土壤中微生物活动适宜的比例范围^[24],施用有机肥后,土壤 C/N 升高,若氮素不足,造成微生物与作物争夺养分,影响分蘖过程,补充适宜氮肥后,不仅满足了微生物活动所需养分,也有充足养分保障小麦整个生育期的正常生长,从而增加小麦穗数和产量。直到施氮量过高,土壤溶液中过高的氮含量会降低小麦根系活力,限制养分吸收,导致公顷穗数下降,进而减产。

因此,在有机无机肥配施条件下,氮肥的施用不仅要适量,而且要同时满足微生物活动和作物生长的需要。那么,究竟配施多少氮肥才能获得最高的小麦产量呢? 沈新磊等^[25]研究指出,在黄土高原旱塬地区,施氮 225 kg N·hm⁻² 更有利于冬小麦的高产和稳产。本研究通过将小麦产量与施氮量进行回归分析发现,在本试验条件下,有机肥与 164 kg N·hm⁻² 氮肥配施可以获得最高的理论产量 4731 kg·hm⁻²,较不施肥处理增产 24.3%。在不施有机肥的情况下,则需要施用 174 kg N·hm⁻² 才可达到理论最高产 4519 kg·hm⁻²,说明有机无机配施可以在较少的氮肥用量下获得更大程度的增产,证明了有机肥替代部分氮肥的可行性。

3.2 冬小麦氮素利用率及土壤硝态氮残留量

如何合理有效地利用氮肥,减少氮素损失一直是旱地小麦施肥研究的热点问题。巨晓棠等^[16]指出,如果采取有效的氮肥施用方法,按照作物的需求动态调控施肥,就可减少氮素损失,提高氮肥利用率。在本试验中,通过在施用适量氮肥的基础上(75~150 kg N·hm⁻²)配施有机肥,NUE 较相同施氮量下单施化肥处理增加 19.1%~65.8%。这与许多研究^[12,26-27]的结果一致。究其原因,一方面,有机肥中养分全面,使土壤中氮、

表 4 不同施肥处理对 0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的影响

Table 4 Effect of different fertilization practices on soil organic matter, total N, available P and available K in 0~20 cm soil layer

有机肥	氮水平	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹
- M	N0	13.8c	0.72b	8.1c	136.5bc
	N75	14.7bc	0.85ab	7.8cd	102.3cd
	N150	15.1abc	0.88ab	7.1cd	100.7d
	N225	15.3abc	0.89ab	6.3d	89.9d
	N300	15.3abc	0.92a	7.3cd	108.7cd
+ M	N0	14.6bc	0.85ab	15.3a	233.8a
	N75	15.5ab	0.89ab	14.8ab	222.2a
	N150	16.3a	0.95a	12.4b	206.0ab
	N225	16.1ab	0.94a	13.4ab	188.2ab
	N300	15.8ab	0.98a	13.6ab	199.1ab
效应分析					
有机肥	- M	14.8B	0.85B	7.3B	107.6B
	+ M	15.7A	0.92A	13.9A	209.9A
氮水平	N0	14.2B	0.78B	11.7A	157.7A
	N75	15.1AB	0.87AB	11.3A	135.5AB
	N150	15.7A	0.92A	9.7B	124.1B
	N225	15.7A	0.92A	9.8B	120.3B
	N300	15.7A	0.95A	10.5AB	134.0AB

磷、钾等养分均衡,有利于土壤养分库的积累,增加了氮素的固定,同时促进了作物对氮素的吸收^[28];另一方面,许多研究表明,配施有机肥可以协调土壤供氮与作物需氮的关系。在作物生长前期促进化肥氮的微生物固定,而在作物需氮量大的时候将养分释放,促进作物氮素吸收^[29-30]。除此之外,有机肥也可促进根系生长,增加根在深层土壤的分布,延缓根系衰老,从而促进作物吸收养分^[31]。

一些研究表明,施氮量较低时土壤残留氮保持在较低水平,而施氮量过多时,土壤中氮素残留量和氮损失量显著增加^[32-33]。在本试验中,无论是单施化肥还是有机无机肥配施,0~200 cm 土层土壤硝态氮累积量均随施氮量的增加线性递增。当施氮量大于 150 kg N·hm⁻² 时,配施有机肥后土壤硝态氮累积量高达 359.3~960.7 kg N·hm⁻²,显著高于单施化肥处理。如此高的硝态氮残留,在渭北旱地很容易通过淋洗或反硝化途径排除土壤-作物体系,造成对环境的潜在污染。但是,通过分析 0~200 cm 土层剖面硝态氮分布情况,本研究发现,在氮肥用量适宜的情况下(0~150 kg N·hm⁻²),配施有机肥仅增加了 0~100 cm 土层硝态氮含量,100 cm 以下土层与无机肥单施处理相比没有显著差异,而且没有硝态氮累积峰的出现。这说明有机肥与适量氮肥配施可以在一定程度上将硝态氮固持在根层供下一季作物吸收利用,从而抑制其向深层移动和累积,与杨学云等^[34]的研究结果一致。这可能是由于有机肥的施入不仅活化土壤微生物,增加微生物对矿质态氮素的固持作用,也增加了农田土壤团聚体含量以及土壤阳离子交换量,促进硝态氮的晶格固定^[35]。

那么,如果用有机肥替代部分氮肥,是否能够在保证作物根层养分供应的同时,减少深层土壤硝态氮含量呢?一些研究表明,在等氮量条件下,随着有机肥配施比例的增加,100 cm 以下土壤硝态氮净增加量减少^[36-37]。本研究也发现,在农户习惯施氮量(225 kg N·hm⁻²)和当地推荐施氮量(150 kg N·hm⁻²)的基础上适当减量(75 kg N·hm⁻²)后,配施有机肥显著降低了 60 cm 以下土壤硝态氮含量,减少了硝态氮淋失的风险,表明用有机氮替代部分无机肥料氮在控制农业面源污染方面具有优越性。

3.3 土壤养分

土壤肥力的高低是制约农作物产量的一个重要因素。土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量均为衡量土壤肥力的重要指标。在本研究中,有机无机配施 3 年后,土壤有机质含量较试验前提高 9.0%,较单施

化肥处理提高 6.1%,与高亚军等^[38]研究结果一致。高会议等^[39]研究指出,黄土旱塬小麦种植地区,根茬碳与外源碳之和可以在很大程度上(94%)解释土壤有机碳变异的原因。因此,有机无机配施对土壤有机质的提升作用一方面是由于有机物料的投入直接增加了农田碳投入量,另一方面则由于有机无机配施促进了作物生长,从而增加了有机物的还田量。

在单施化肥的 5 个处理中,土壤速效磷和速效钾含量均低于试验前,且随着施氮量的增加,呈现出降低的趋势。其原因主要是由于氮的投入在促进作物生长的同时增加了作物的养分携出量,而土壤中原有的磷和钾,以及外源磷肥(90 kg N·hm⁻²)和钾肥(60 kg N·hm⁻²)无法满足作物需求,因而造成土壤速效磷、速效钾含量的降低。而配施有机肥以后,有机肥带入了大量的有效磷和钾,使得土壤速效磷、速效钾含量较单施化肥处理提高近 1 倍。

4 结论

渭北旱塬雨养条件下,连续 3 年有机无机肥配施相比单施化肥处理可以在减少 5.7%氮肥用量的条件下,获得 4.7%的增产效果,同时显著增加小麦产量、地上部吸氮量、NUE 以及土壤养分含量。其中以 M+N150 处理效果最佳。但是,当施氮量大于 150 kg N·hm⁻² 时,配施有机肥会显著加剧 0~200 cm 土壤硝态氮累积,加大硝态氮淋溶风险。因此,在渭北旱塬特殊的生态环境下,建议在施用有机肥(猪粪)30 t·hm⁻² 的基础上配施 75~150 kg N·hm⁻² (有机氮:无机氮=1:0.46~0.91),以防止过量氮素残留所造成的环境污染,并保证小麦高产。

参考文献:

- [1] 黄明斌,李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143-148.
HUANG Ming-bin, LI Yu-shan. On potential yield increase of dryland winter wheat on the loess tableland[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(2): 143-148.
- [2] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245-253.
ZHAO Hu-bing, WANG Zhao-hui, GAO Ya-jun, et al. Investigation and evaluation of household wheat fertilizer application in Shaanxi Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 245-253.
- [3] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等. 西北典型区域旱地冬小麦农户施肥调查分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 840-848.
ZHAO Hu-bing, WANG Zhao-hui, GAO Ya-jun, et al. Investigation

- and analysis of dryland winter wheat fertilizer application in northwest typical areas[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 840-848.
- [4] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397-414.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] 李贞宇, 王旭, 高志岭, 等. 我国不同区域小麦施肥资源环境影响的生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1417-1422.
- LI Zhen-yu, WANG Xu, GAO Zhi-ling, et al. Life cycle assessment of wheat fertilization in different regions of China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(7): 1417-1422.
- [7] Meade G, Lalor S T J, Cabe M. An evaluation of the combined usage of separated liquid pig manure and inorganic fertiliser in nutrient programmes for winter wheat production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(2): 62-70.
- [8] Zhou Z C, Gan Z T, Shangguan Z P, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid cropland[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45(45): 20-26.
- [9] Kihanda F M, Warren G P, Micheni A N. Effect of manure application on crop yield and soil chemical properties in a long-term field trial of semi-arid Kenya[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 76(2/3): 341-354.
- [10] Bhattacharyya R, Kundu S, Prakash V. Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean-wheat system of the Indian Himalayas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(1): 33-46.
- [11] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in Northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 173-180.
- [12] Abbasi M K, Tahir M M. Economizing nitrogen fertilizer in wheat through combinations with organic manures in Kashmir, Pakistan[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(1): 169-177.
- [13] 邢素丽, 韩宝文, 刘孟朝, 等. 有机无机配施对土壤养分环境及小麦增产稳定性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(增刊): 135-140.
- XING Su-li, HAN Bao-wen, LIU Meng-zhao, et al. The effect of NPK fertilizer combined with soil organic manure on soil nutrition and wheat yield increasing[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(Suppl): 135-140.
- [14] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 282-288.
- ZHU Cai-hong, DONG Cai-xia, SHEN Qi-rong, et al. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 282-288.
- [15] 樊军, 郝明德. 旱地长期定位施肥土壤水氮资源利用的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 57-60.
- FAN Jun, Hao Ming-de. Utilization of soil water and nitrogen resources in dry land under a long-term fertilizer experiment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(2): 57-60.
- [16] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 192-197.
- JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 12(2): 192-197.
- [17] 陈欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(13): 2580-2590.
- CHEN Huan, CAO Cheng-fu, KONG Ling-cong, et al. Study on wheat yield stability in Huaibei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13): 2580-2590.
- [18] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 225(1): 86-92.
- [19] 何晓雁, 郝明德, 李慧成, 等. 黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1333-1340.
- HE Xiao-yan, HAO Ming-de, LI Hui-cheng, et al. Effect of different fertilization on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1333-1340.
- [20] 郝明德, 来璐, 王改玲, 等. 黄土高原塬区旱地长期施肥对小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1893-1896.
- HAO Ming-de, LAI Lu, WANG Gai-ling, et al. Effects of long-term fertilization on wheat yield on Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1893-1896.
- [21] 刘一. 施肥对黄土高原旱地冬小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 40-42.
- LIU Yi. Influence of fertilization on the yield of winter wheat and soil fertility in dryland of Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 40-42.
- [22] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 178-185.
- HAO Xiao-yu, ZHOU Bao-ku, MA Xing-zhu, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 178-185.
- [23] 孙本普, 孙士宗, 李凤云, 等. 气候条件对冬小麦穗数的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 60-64.
- SUN Ben-pu, SUN Shi-zong, LI Feng-yun, et al. Influence of climatic condition on the spike number per wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(4): 60-64.
- [24] 胡玮, 李桂花, 任意, 等. 不同碳氮比有机肥组合对低肥力土壤小麦生物量和部分土壤肥力因素的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, 6(2): 22-27.
- HU Wei, LI Gui-hua, REN Yi, et al. The effects of combined organic manure in different carbon-to-nitrogen ratio on wheat biomass and soil

- fertility in low fertility soil[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2011, 6(2): 22-27.
- [25] 沈新磊, 付秋萍, 王全九. 施氮量对黄土旱塬区冬小麦产量和土壤水分动态的影响[J]. *生态经济*, 2009(11): 107-119.
SHEN Xin-lei, FU Qiu-ping, WANG Quan-jiu. Effects of nitrogen application on winter wheat grain yield and soil moisture dynamics in rain-fed farmland of the Loess Plateau[J]. *Ecological Economy*, 2009(11): 107-119.
- [26] 闫鸿媛, 段英华, 徐明岗. 长期施肥下中国典型农田小麦氮肥利用率的时空演变[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(7): 1399-1407.
YAN Hong-yuan, DUAN Ying-hua, XU Ming-gang. Nitrogen use efficiency of wheat as affected by long-term fertilization in the typical soil of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(7): 1399-1407.
- [27] Shah S A, Shah S M, Mohammad W, et al. N uptake and yield of wheat as influenced by integrated use of organic and mineral nitrogen[J]. *International Journal of Plant Production*, 2009, 3(3): 45-56.
- [28] 张广凯, 宋祥云, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对小麦-玉米氮素利用及产量品质的影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(4): 157-161.
ZHANG Guang-kai, SONG Xiang-yun, LIU Shu-tang, et al. Effect of long-term application on nitrogen utilization and yield quality of wheat and maize[J]. *Acta Agricultura Borealis-Sinica*, 2015, 30(4): 157-161.
- [29] Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat-maize experiment[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 126-134.
- [30] Wu C L, Shen Q R, Mao J D. Fate of ^{15}N after combined application of rabbit manure and inorganic N fertilizers in a rice-wheat rotation system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46: 127-137.
- [31] 李絮花, 杨守祥, 于振文, 等. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 467-472.
LI Xu-hua, YANG Shou-xiang, Yu Zhen-wen, et al. Effects of organic manure application on growth and senescence of root in winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4): 467-472.
- [32] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 286-291.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 286-291.
- [33] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 257-262.
SUN Bo, WANG Xing-xiang, ZHANG Tao-lin. Influencing factors of leaching nutrients in Red Soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 257-262.
- [34] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 134-138.
YANG Xue-yun, ZHANG Shu-lan, YUAN Xin-min, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 134-138.
- [35] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152.
LI Juan, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144-152.
- [36] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, 2(6): 11-14.
WANG Zhi-yong, HONG Mei, YANG Dian-lin, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and combined application of organic manure and chemical fertilizer on yield in summer maize and on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ [J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2008, 2(6): 11-14.
- [37] 谢红梅, 朱波, 朱钟麟. 无机与有机肥配施麦田(紫色土)铵态氮及硝态氮的时空变异[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 118-121.
XIE Hong-mei, ZHU Bo, ZHU Zhong-lin. Temporal-spatial variations of ammonia and nitrate under application of inorganic and organic fertilizers in purple soil of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 118-121.
- [38] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 27-30.
GAO Ya-jun, ZHU Pei-li, HUANG Dong-mai, et al. Long-term impact of different soil management on organic matter and total nitrogen in rice-based cropping system[J]. *Soil Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 27-30.
- [39] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 施肥措施对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1333-1338.
GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao, et al. Effects of fertilization on wheat yield and soil organic carbon accumulation in rainfed-loessial tablelands[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1333-1338.