

长期不同施肥措施对雨养条件下陇东旱塬土壤氮素的影响^{*}

王 婷^{1, 2} 李利利³ 周海燕³ 丁宁平³ 车宗贤¹

(1 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

(2 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

(3 甘肃省平凉市农业科学研究所, 甘肃平凉 744000)

摘 要 基于1978年开始的陇东旱塬定位试验, 分析雨养条件下麦田0~100 cm剖面土壤氮素状况。设计6种试验处理: 不施肥、氮肥、氮磷肥、氮磷配施秸秆、有机肥、氮磷配施有机肥。结果表明: 有机肥、氮磷配施有机肥处理改善土壤氮素肥力效果优于其他施肥措施, 0~40 cm土层全氮、碱解氮、无机氮含量均显著增加, 其中0~20 cm土壤全氮较36年前平均提高了26.2%; 氮磷配施秸秆处理土壤全氮及碱解氮显著高于对照, 全氮与试验前持平或略有提升; 氮肥、氮磷肥处理的耕层土壤全氮较试验前分别降低了13.1%和6.4%。氮肥处理深层土壤硝态氮明显较高, 其他各施肥处理均能减少硝态氮下移。不同施肥处理改变了土壤的无机氮构成, 有机肥与秸秆的作用有较大差异。结果说明不同施肥显著影响农田土壤氮素状况, 施用有机肥是培育土壤氮库, 而无机氮磷肥配合及有机无机配施是减少NO₃-N下移的有效手段。

关键词 长期定位试验; 不同施肥制度; 土壤氮素特征; 陇东旱塬

中图分类号 S158.2 **文献标识码** A

施氮是确保作物产量及提升地力的重要措施, 氮肥也是造成环境压力潜在的风险源。其风险主要来自长期及大量施用氮肥导致的硝态氮(NO₃-N)在土壤中的无效累积^[1], 可能进一步引起NO₃-N向深层土壤迁移直至进入地下水系统, 成为水体环境质量恶化的重要影响因素, 因此NO₃-N淋洗问题也成为氮素损失研究中的热点问题。有机肥是我国传统的、以氮为主的重要肥料资源, 无机有机配合在我国有长期的实践历史, 但大量施用有机肥、尤其是在配合施氮量较大的条件下, 会导致土壤NO₃-N累积, 同样可能导致环境风险^[2]。

氮素养分是土壤肥力的关键指标。西北黄

土高原土壤氮素营养一般较低, 全氮含量多在 $0.70 \pm 0.28 \text{ g kg}^{-1}$, 属于我国氮素肥力最低的区域之一^[3]。旱塬是黄土高原的重要组成部分, 长期以来, 该地区偏施氮肥的现象较为突出, 目前主要的施肥方式有单施氮肥、氮磷配施以及与氮磷与秸秆、有机肥的配施等。黄土高原地区土层深厚, 地下水位低, 除了应当关注NO₃-N的淋溶风险, 也要关注作物根系对深层养分的有效利用, 因为作物根系有效吸收往往并不局限于浅层, 深层养分对作物同样具有较高生物有效性^[4-5]。所以, 有必要开展土壤剖面养分分布及其生物有效性的研究。近年来, 尽管已有部分研究报道了黄土高原长

^{*} 国家自然科学基金地区科学基金项目(31560584)和甘肃省农业科学院创新专项(2013GAAS12)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31560584) and the Special Fund Project of Gansu Academy of Agricultural Sciences (No. 2013GAAS12)

作者简介: 王 婷(1982—), 女, 甘肃天水人, 硕士, 助理研究员。主要从事旱塬定位施肥制度及作物栽培技术和生态生理研究。E-mail: wt1982_2000_2000@163.com

收稿日期: 2015-03-03; 收到修改稿日期: 2015-09-09

期施肥后的土壤剖面氮素营养^[6-7]及 NO_3^- -N分布规律^[8-10], 但综合研究土壤氮素的报道不多, 且各地施肥水平、试验年限、灌水条件等因素之间有较大差异, 需要进一步开展有关研究, 以丰富土壤氮素营养的科学信息。

针对陇东地区施肥实践, 早在1978年就建立了不同施肥制度定位试验。本文依托该试验, 研究田间不同时期的0~100 cm剖面土壤不同氮素组分分布规律, 以揭示在陇东旱塬气候、土壤、种植模式、不同施肥制度下的土壤氮素特征, 填补该地区有关土壤剖面氮素营养研究的空白, 同时为指导该地区科学施氮提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

定位试验位于甘肃省平凉市农业科学研究所高平试验站, 年均降水540 mm, 年均气温8℃。供试土壤类型为典型黑垆土, 试验开始前土壤基本理化性状为: 有机质 10.8 g kg^{-1} 、全氮 0.95 g kg^{-1} 、全磷 0.57 g kg^{-1} 、碱解氮 69.5 mg kg^{-1} 、有效磷 6.8 mg kg^{-1} 、速效钾 163 mg kg^{-1} ^[11]。试验设6个处理: 不施肥(CK); 单施氮肥 90 kg hm^{-2} (N); 氮磷肥配施, N 90 kg hm^{-2} + P_2O_5 75 kg hm^{-2} (NP); 秸秆与氮磷肥配施, 秸秆 3750 kg hm^{-2} +N 90 kg hm^{-2} , 隔年施 P_2O_5 75 kg hm^{-2} (SNP); 单施有机肥 75000 kg hm^{-2} (M); 氮磷肥与厩肥配施, 75000 kg hm^{-2} +N 90 kg hm^{-2} + P_2O_5 75 kg hm^{-2} (MNP)。试验设3次重复。该试验采用2年玉米—4年小麦的轮作为主(其中, 1999、2000年分别种植高粱、大豆), 目前处在冬小麦种植周期(2013—2016年)。

氮肥为尿素(含N 46%), 磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%), 有机肥为厩肥(全N多年测试值分别为 $1.1 \sim 1.5 \text{ g kg}^{-1}$)。肥料及秸秆于小麦播种前一次性撒施于地表, 翻入土中, 小麦其他时期不再追肥。所有作物均依靠自然降水, 其他管理措施一致。

1.2 样品采集与分析

2014年5月18日、9月2日, 即冬小麦的孕穗期及夏闲期, 分别取土壤样品。取样深度0~100 cm, 每隔20 cm土层取1个样, 每小区随机取5点的同层土样混合, 部分土样放置4℃冰箱保存待测无

机氮, 部分土样自然风干待测全氮及碱解氮。

土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定。无机氮采用 2 mol L^{-1} KCl浸提(鲜土: 浸提液=1: 5), 连续流动分析仪(德国Seal, AA3)测定 NH_4^+ 、 NO_3^- , 同时测定含水量用于结果计算。无机氮为 NH_4^+ 、 NO_3^- 之和。

1.3 数据处理

采用SPSS 17.0进行显著性检验, 采用Excel 2003进行数据运算及作图。

2 结 果

2.1 全氮含量的剖面分布特征

土壤全氮结果列于表1。0~20 cm土层, M和MNP处理在孕穗期及夏闲期均显著高于其他处理, 其次是SNP及NP处理; N处理土壤全氮在两个时期与CK均无明显差异。20~40 cm土层, M和MNP处理依然显著高于其他处理, 余下4个处理无较大差异。40 cm以下三个土层, 各处理间全氮含量趋于接近, 但也存在一定程度的不同, 主要表现为夏闲期CK处理出现低于其他施肥处理的趋势。夏闲期各施肥处理60~100 cm两个土层, 全氮含量明显高于小麦孕穗期对应土层的全氮含量。各处理0~40 cm土层的全氮含量均显著高于40~100 cm土层。其中, M和MNP处理随土层加深全氮含量下降幅度较大, CK和N处理在整个土壤剖面各层次的全氮含量变化不大, SNP和NP处理随土层加深全氮含量下降幅度居中。以上结果表明, 与CK相比, M和MNP处理大幅度提高了上层土壤全氮含量, SNP和NP处理作用也较明显但与CK相差不大, N处理未见明显效果。

2.2 碱解氮含量的剖面分布特征

表2是碱解氮结果。相同剖面不同处理间比较来看, 孕穗期0~20 cm土层碱解氮含量表现为 $M \approx MNP > SNP > NP \approx CK \approx N$; 20~40 cm土层略有不同, 为 $M \approx MNP > NP \approx SNP > CK \approx N$ 。40 cm以下土层, 各处理间没有明显差异。到了夏闲期, 0~20 cm各处理含量表现为 $M \approx MNP > SNP > NP > CK \approx N$, 20~40 cm的规律为 $MNP \approx M > SNP \geq CK \geq NP \geq N$ 。40~60 cm土层全氮含量差异不大, 但N和NP处理有低于其他处理的趋势; 60~100 cm土层各处理间差异不大。各处理均表现出0~40 cm土层显著高于40 cm以下土层, 40 cm

表1 长期不同施肥处理下不同时期麦田土壤全氮含量

Table 1 Soil total nitrogen contents in wheat fields different in long-term fertilization patterns at different stages (g kg ⁻¹)							
时期 Stage	土层 Soil layer (cm)	处理Treatments					
		CK	N	NP	SNP	M	MNP
孕穗期 Booting	0 ~ 20	0.79 aC	0.84 aC	0.98 aB	0.95 aB	1.19 aA	1.19 aA
	20 ~ 40	0.81 aB	0.76 aB	0.81 bB	0.83 aB	1.04 bA	1.02 bA
夏闲期 Summer fallow	40 ~ 60	0.58 bB	0.63 bAB	0.65 cAB	0.68 bA	0.61 cAB	0.61 cAB
	60 ~ 80	0.61 bA	0.65 bA	0.64 cA	0.61 bA	0.59 cA	0.63 cA
	80 ~ 100	0.60 bAB	0.62 bA	0.63 cA	0.59 bAB	0.55 cB	0.57 cAB
	0 ~ 100	0.68 D	0.70 CD	0.74 BC	0.73 C	0.80 AB	0.81 A
	0 ~ 20	0.84 aDE	0.83 aE	0.88 aD	1.00 aC	1.26 aA	1.16 aB
	20 ~ 40	0.72 bC	0.73 bBC	0.75 bBC	0.84 bAB	0.94 bA	0.94 bA
	40 ~ 60	0.58 cB	0.61 dAB	0.63 cA	0.61 dAB	0.65 cA	0.64 cA
	60 ~ 80	0.64 cA	0.65 cA	0.67 cA	0.67 cA	0.66 cA	0.70 cA
	80 ~ 100	0.59 cC	0.68 cAB	0.73 bA	0.66 cB	0.70 cAB	0.70 cAB
	0 ~ 100	0.67 C	0.70 C	0.74 B	0.76 B	0.84 A	0.83 A

注：同一列不同小写字母表示土层间差异显著 ($p < 0.05$)，同一行不同大写字母表示各处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between soil layers ($p < 0.05$) . Different uppercase letters indicate significant differences between fertilization treatments ($p < 0.05$) . The same as below

表2 长期不同施肥制度下不同时期麦田土壤碱解氮含量

Table 2 Soil available nitrogen contents in wheat fields different in long-term fertilization patterns at different stages (mg kg ⁻¹)							
时期 Stage	土层 Soil layer (cm)	处理Treatments					
		CK	N	NP	SNP	M	MNP
孕穗期 Booting	0 ~ 20	52.4 9 aC	52.24 aC	56.62 aC	71.74 aB	82.49 aA	75.49 aB
	20 ~ 40	49.99 aBC	48.49 aC	57.49 aB	55.24 bBC	74.99 aA	73.99 aA
夏闲期 Summer fallow	40 ~ 60	33.24 bA	34.49 bA	33.74 bA	38.99 cA	35.74 bA	39.99 bA
	60 ~ 80	33.50 bA	33.49 bA	37.49 bA	31.25 cA	32.99 bA	37.49 bA
	80 ~ 100	33.93 bA	36.93 bA	33.43 bA	33.12 cA	35.18 bA	34.87 bA
	0 ~ 100	40.63 C	41.13 BC	43.76 BC	46.07 B	52.28 A	52.37 A
	0 ~ 20	53.68 aD	52.93 aD	58.12 aC	69.18 aB	86.42 aA	82.17 aA
	20 ~ 40	49.68 aBC	42.68 bC	46.18 bBC	52.43 bB	59.68 bA	60.68 bA
	40 ~ 60	35.18 bA	30.43 cB	34.68 cB	32.93 cAB	30.68 dAB	33.68 cAB
	60 ~ 80	30.87 bA	29.62 cA	32.87 cA	30.87 cA	31.87 dA	33.87 cA
	80 ~ 100	32.62 bA	31.87 cA	34.37 cA	30.87 cA	37.37 cA	31.37 cA
	0 ~ 100	40.41 C	37.51 D	41.25 BC	43.26 B	49.20 A	48.36 A

以下土层的碱解氮含量均有较大幅度下降；与全氮类似，M、MNP两处理随土层加深下降幅度较大，SNP、NP两处理下降幅度居中，CK、N两处理下降幅度较小。总体上，M和MNP处理大幅度提高了0 ~ 40 cm土层碱解氮含量，SNP处理也有较大幅度

提升，NP处理较N处理差异不大，N处理对碱解氮未见明显贡献。

2.3 铵态氮、硝态氮含量的剖面分布特征
2.3.1 孕穗期铵态氮、硝态氮含量 表3是孕穗期土壤剖面NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及Nmin含量。相同层

次各处理间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均无显著差异。从各处理在剖面上的垂直分布特征来看, N及SNP处理的峰谷出现在40~60 cm土层, 但与其他层次差异不显著; 其他处理出现在60~80 cm土层, 且与其他层次间多表现出显著性差异。总体来看, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在不同层次间以及不同处理间的差异不大。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 明显不同, 相同层次受不同处理的影响较大。其中0~20 cm, 总体趋势为 $\text{M} \approx \text{MNP} > \text{NP} \approx \text{N} \geq \text{SNP} \approx \text{CK}$, 两个有机肥处理显著高于其他4个处理; N及NP处理虽然高于SNP和CK处理, 但4个处理间差异不显著。20~40 cm

土层同样以M处理最高, 但MNP处理显著低于M处理, 趋势为 $\text{M} > \text{MNP} > \text{NP} \approx \text{N} > \text{SNP} \approx \text{CK}$, 该土层NP、N处理也处于较高水平。N处理在40 cm以下三个层次均表现为显著高于其他处理, 并最终导致该处理0~100 cm土层整体上 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于其他所有处理, 其他处理间差异不大且含量较低。此外, 氮肥配施磷肥大幅度降低40~100 cm土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 氮磷与秸秆配施可大幅降低0~40 cm土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。从表3还可以看出, 由于硝态氮在无机氮中占比较大, 且铵态氮总体差异不大, 本试验中Nmin规律与硝态氮几乎完全一致。

表3 长期不同施肥制度下小麦孕穗期土壤剖面的无机氮含量

Table 3 Soil inorganic nitrogen contents in wheat field different in long-term fertilization patterns at the booting stage (mg kg^{-1})

时期 Stage	土层 Soil layer (cm)	处理Treatments					
		CK	N	NP	SNP	M	MNP
铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0~20	1.07 abA	0.66 aA	0.64 bA	0.76 aA	1.01 bA	0.67 cA
	20~40	1.07 abA	1.02 aA	1.12 bA	0.98 aA	1.06 bA	1.07 bcA
	40~60	1.20 abA	1.87 aA	1.10 bA	1.61 aA	1.37 abA	1.42 abA
	60~80	1.51 aA	1.49 aA	1.83 aA	1.32 aA	1.77 aA	1.73 aA
	80~100	0.67 bA	1.33 aA	0.85 bA	1.68 aA	1.16 bA	0.72 cA
	0~100	1.10 A	1.27 A	1.11 A	1.27 A	1.27 A	1.12 A
硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0~20	1.95 aB	4.30 cB	4.89 bB	2.14 aB	12.95 aA	12.01 aA
	20~40	2.53 aD	7.19 bcABC	8.09 aAB	4.13 aCD	10.64 aA	6.46 bBC
	40~60	2.29 aB	13.43 aA	4.46 bcB	3.63 aB	2.07 bB	2.25 cB
	60~80	2.96 aB	9.08 bA	1.75 cB	2.09 aB	2.69 bB	2.71 cB
	80~100	2.34 aBC	7.74 bA	3.58 bcB	3.09 aBC	1.96 bC	2.41 cBC
	0~100	2.41 D	8.35 A	4.55 BC	3.02 C	6.06 B	5.17 B
无机氮 Inorganic nitrogen	0~20	3.02 aB	4.96 cB	5.52 bB	2.90 aB	13.96 aA	12.67 aA
	20~40	3.59 aC	8.21 bcAB	9.21 aAB	5.11 aB	11.70 aA	7.53 bBC
	40~60	3.48 aB	15.30 aA	5.56 bB	5.23 aB	3.44 bB	3.67 bcB
	60~80	4.47 aB	10.57 bA	3.57 bB	3.41 aB	4.46 bB	4.44 bcB
	80~100	3.00 aB	9.08 bA	4.44 bB	4.77 aB	3.12 bB	3.13 cB
	0~100	3.51 C	9.62 A	5.66 BC	4.29 C	7.34 B	6.29 B

2.3.2 夏闲期铵态氮、硝态氮含量 表4是夏闲期麦田土壤的无机氮含量。与孕穗期明显不同, 夏闲期铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)总体上表现出表层(0~20 cm)及中层(40~80 cm)低、亚表层(20~40 cm)及下层(80~100 cm)高的特点。但夏闲期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也不高, 并且CK处理表层含量明显低于其他处理以及其他土层, 同时MNP处理在表层

(0~20 cm)的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也明显较低, 与该处理孕穗期类似。

M、MNP以及SNP三个处理的表层及亚表层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较孕穗期大幅上升。表层(0~20 cm)的趋势是 $\text{MNP} > \text{M} > \text{SNP} \geq \text{NP} \approx \text{N} \geq \text{CK}$, 亚表层(20~40 cm)则表现为 $\text{M} > \text{MNP} > \text{N} \approx \text{NP} \approx \text{SNP} \geq \text{CK}$ 。N处理虽然表层及底层略低但

在整个剖面较为均衡，且N处理在40~80 cm两层明显高于其他处理，同样显示出该处理NO₃⁻-N有从表层下移的特点。NP处理NO₃⁻-N含量随土层加深逐渐降低，在40~100 cm土层中含量较低。同时，可以看出，虽然在0~40 cm土层M、MNP处理NO₃⁻-N含量很高，但这两种处理在40~100 cm土层

的NO₃⁻-N含量并未大幅上升，SNP处理也有类似趋势。此外，与孕穗期类似的是，MNP处理NO₃⁻-N含量在亚表层也表现出明显的快速下降趋势。与孕穗期类似，夏闲期Nmin同样表现出与硝态氮类似的分布规律。

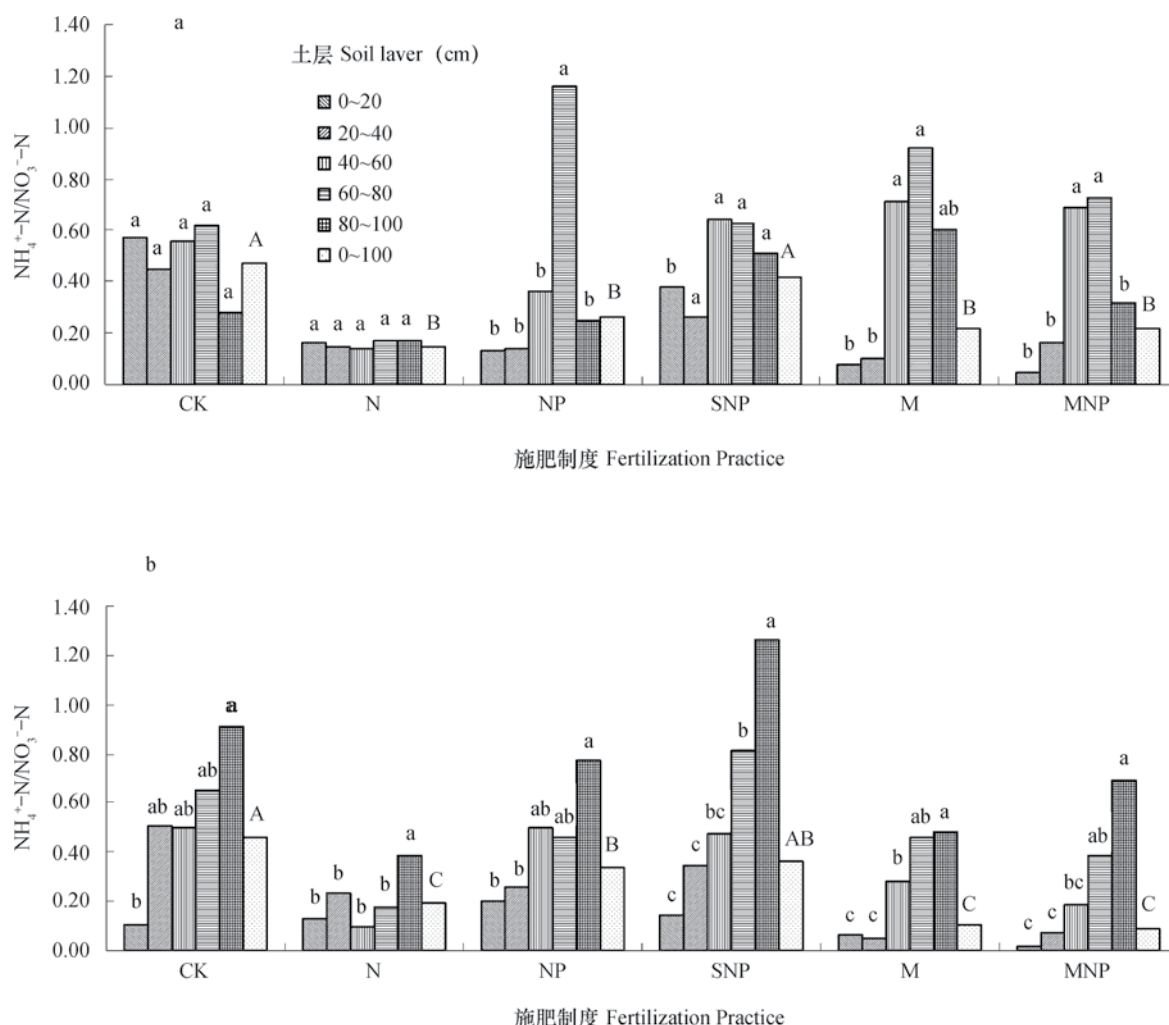
2.3.3 铵态氮/硝态氮比值 铵态氮/硝态氮比

表4 长期不同施肥制度下小麦夏闲期土壤剖面的无机氮含量

Table 4 Soil inorganic nitrogen contents in wheat fields different in long-term fertilization patterns at the summer fallow stage (mg kg ⁻¹)							
时期	土层	处理Treatments					
Stage	Soil Layer (cm)	CK	N	NP	SNP	M	MNP
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0~20	0.34 cB	0.86 bAB	1.39 aA	1.56 bcA	1.58 aA	0.90 cAB
	20~40	2.43 aA	1.83 abAB	2.01 aAB	2.29 abAB	1.41 aB	1.72 bAB
	40~60	1.91 abA	1.09 bA	1.27 aA	1.25 cA	1.40 aA	1.24 bcA
	60~80	1.47 bcA	1.55 abA	1.02 aA	1.65 abcA	1.27 aA	1.55 bcA
	80~100	1.89 abA	2.33 aA	2.00 aA	2.48 aA	1.73 aA	2.52 aA
	0~100	1.61 A	1.53 A	1.54 A	1.85 A	1.47 A	1.58 A
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0~20	3.40 abC	6.56 bcC	6.68 aC	10.81 aC	29.81 aB	47.92 aA
	20~40	5.09 aC	8.07 abcC	7.95 aC	7.32 bC	31.57 aA	24.02 bB
	40~60	4.21 abC	10.55 aA	2.91 bC	2.99 cC	4.93 bBC	7.11 cB
	60~80	2.39 bBC	9.12 abA	2.84 bBC	2.12 cC	2.69 bBC	4.50 cB
	80~100	2.50 bBC	5.98 cA	2.61 bBC	2.01 cC	3.67 bBC	4.29 cAB
	0~100	3.52 D	8.06 C	4.60 D	5.05 D	14.54 B	17.57 A
无机氮 Inorganic nitrogen	0~20	3.74 bC	7.42 bC	8.07 aC	12.37 aC	31.39 aB	48.82 aA
	20~40	7.52 aB	9.90 abB	9.96 aB	9.61 bB	32.97 aA	25.74 bA
	40~60	6.13 aBC	11.64 aA	4.18 bC	4.24 cC	6.34 bBC	8.34 cB
	60~80	3.86 bB	10.68 aA	3.85 bB	3.77 cB	3.96 bB	6.05 cB
	80~100	4.38 bC	8.32 abA	4.61 bBC	4.49 cC	5.40 bBC	6.81 cAB
	0~100	5.13 D	9.59 C	6.13 D	6.89 D	16.01 B	19.15 A

值（铵硝比）结果见图1。孕穗期（图1a）结果显示，施肥大多增加了表层及亚表层土壤NO₃⁻-N占比、降低铵硝比值，0~40 cm土层化肥处理（N、NP）及有机肥处理（MNP、M）的铵硝比明显低于CK及SNP处理，N处理在整个剖面始终处于低值。除N处理外，各处理的铵硝比多在40~60 cm以及60~80 cm土层相对较高。铵硝比在剖面的整体趋势为CK≈SNP>NP≈M≈MNP>N，同样说明单施氮土壤剖面NO₃⁻-N含量相对较高，且氮磷配施秸

秆后情况较为特别，有提高NH₄⁺-N占比的趋势。各处理铵硝比随土层深度逐渐加大的趋势明显（N处理略有不同），孕穗期在40~60 cm或者60~80 cm土层铵硝比较高（图1-I），夏闲期各处理铵硝比最大值均出现在80~100 cm土层（图1b）。此外，值得关注的是，两个有机肥处理无论在孕穗期还是在夏闲期，0~40 cm均表现出很低的铵硝比，可见有机肥投入大大提升了0~40 cm土层NH₄⁺-N向NO₃⁻-N的转化量，导致NO₃⁻-N在表层积累。



注：柱形上方不同小写字母表示同一施肥处理在不同土壤层次间差异显著 ($p < 0.05$)，不同大写字母表示不同施肥处理在0~100 cm剖面差异显著 ($p < 0.05$)。Note: Different lowercase letters above the columns indicate significant differences between soil layers ($p < 0.05$), different uppercase letters indicate significant differences between fertilization practices in the profile of 0~100cm

图1 长期不同施肥制度下土壤0~100 cm剖面的铵态氮/硝态氮比值 (a.孕穗期, b.夏闲期)

Fig. 1 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratio in soil profiles of wheat fields different in long-term fertilization patterns (a. Booting stage; b. Summer fallow stage)

3 讨论

3.1 有机肥及其与氮磷配施提高0~40 cm土壤氮素水平的作用明显

长期以来,有关有机无机配合的研究结果较为一致,长期施用有机肥以及有机无机相结合能够明显增加土壤尤其是耕层土壤养分^[6, 12-13],是土壤培肥、减少环境风险的有效途径,其主要机制是提高土壤有机肥氮素的残留并促进其向有效形态转化^[14]。本试验结果也不例外, M及MNP处理显著提高了土壤表层及亚表层的全氮、碱解氮、无机氮含量,有效氮素含量大幅增加,土壤氮库库容明显提升。两种处理在两个时期的耕层土壤全氮含量均

在 1.2 g kg^{-1} 左右,较试验开始前的 0.95 g kg^{-1} ^[11]有较大幅度提升,平均提高了26.2%,表明土壤氮素肥力明显改善。

有机肥对无机氮的影响也十分明显,两个时期均表现为施用有机肥处理的表层及亚表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著高于其他土层,且夏闲期0~40 cm土层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较孕穗期大幅上升。夏闲期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 上升,应该主要来源于有机肥及秸秆分解以及此两种处理有机质较高、经过夏闲期的有机质矿化所释放的氮素。赵聪等^[6]同样认为,土壤剖面中同年秋季土壤的氮含量高于夏季土壤。同时, M、MNP两种处理在中下土层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量并未大幅上升,说明有机肥起到了对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在表层土壤的蓄积

作用,减缓了其下移风险。在塿土两熟制下的研究也得出相似结果。在党廷辉等^[15]的报道中,MNP处理 NO_3^- -N的累积量最高,与本研究一致,但该报道中的M处理低于N及NP处理,与本研究相反,可能是该研究的施氮水平(120 kg hm^{-2})高于本研究(90 kg hm^{-2})所致。在袁新民等^[2]的报道中,施用有机肥会引起2 m以下深层次土壤中 NO_3^- -N累积,主要是由于灌水所致。此外,虽然 NH_4^+ -N在不同土壤层次的分布规律有所不同,但总体上其绝对值受施肥的影响较小,与吴金水等^[8]的结论类似。

3.2 单施氮肥及氮磷配施对土壤氮素各组分的影响明显不同

彭令发等^[7]的研究认为,单施化学氮肥对土壤肥力影响不明显,而有机肥与化学氮肥配合施用对提高土壤肥力有较好的作用。本试验结果,与对照相比,单施氮肥处理对土壤全氮、碱解氮含量影响不大;氮磷化肥配施对提高土壤全氮和碱解氮有一定的效果,因此,相对而言,肥料配合施用有利于改善全氮及速效氮状况。从本试验的历史来看,目前氮及氮磷处理全氮值(夏闲期分别为 0.826 、 0.885 g kg^{-1})低于试验前土壤全氮含量,分别降低了 13.1% 和 6.4% ,说明以上两种处理不能维持长期的土壤全氮平衡。

本研究结果还表明,单施氮肥处理的土壤 NO_3^- -N有向深层土壤下移的趋势,这种趋势与其他处理明显不同。吴金水等^[8]研究发现 NO_3^- -N在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层出现一个高峰,本试验的N处理在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层也出现明显的 NO_3^- -N高峰,此处理在整个剖面表现为 NO_3^- -N含量均处在较高水平;NP处理除 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 外,其他土层 NO_3^- -N含量大幅降低。这一现象表明,偏施氮肥导致 NO_3^- -N淋失风险加大,化肥的合理配施是消除此风险的重要措施。其他学者的结论也基本类似,施氮易提高土壤中 NO_3^- -N的含量^[6, 16-17];氮磷严重失调时, NO_3^- -N累积率剧增,配施磷肥可以明显减少 NO_3^- -N累积^[18-19]。氮磷或有机肥施用大幅减少了土壤剖面 NO_3^- -N积累^[8, 12],合理施肥配比可以降低深层土壤 NO_3^- -N累积,减轻 NO_3^- -N淋溶风险^[16, 20]。

3.3 秸秆还田可维持土壤氮素肥力且其影响具有明显的季节特征

本研究通过36年长期定位试验,能较好地说明土壤氮素养分对秸秆还田的响应特点。本研究中的SNP处理土壤氮素特征与其他施肥处理不同,其全

氮、碱解氮含量虽然低于有机肥的两个处理,但显著高于N及NP处理(除孕穗期全氮外)。其中,夏闲期全氮含量为 1.005 g kg^{-1} ,高于长期试验开始前的 0.95 g kg^{-1} ^[11],显示长期秸秆还田后土壤全氮有所增加。其他学者^[21-22]的研究结果基本相同,秸秆与化肥配合施用下,土壤全氮及土壤氮素供应水平会显著提高;并且,长期有机无机配施可以提高土壤残留肥料氮的矿化量及有效性^[23]。在红壤上,秸秆的作用类似,长期秸秆还田可以促进红壤水稻土氮素的积累,主要影响 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层,化肥和秸秆配合施用作用更明显^[24]。

有文献报道,多年秸秆还田后土壤 NO_3^- -N在表层积聚^[17];秸秆还田会增加土壤氮素盈余,提高 NO_3^- -N淋失的风险^[25]。但从本试验来看,秸秆还田对 NO_3^- -N影响在不同阶段显现出不同的特点,这正是秸秆的腐解特性所决定的。本研究中,SNP处理孕穗期土壤 NO_3^- -N含量整体偏低、且在剖面分布较为均匀,应该是孕穗期秸秆仍处于腐熟阶段,需要消耗一定的土壤氮素来维持土壤微生物活动需要。该处理在夏闲期则表现为一定程度的 NO_3^- -N表聚现象,与其他文献报道一致,其原因同样是由于秸秆及土壤有机质经过较长时间的夏闲期后,矿化作用释放出氮素。因此,秸秆还田研究中应充分考虑季节性因素的影响。

3.4 雨养农业条件下的旱塿土壤长期不同施肥后氮素去向及转化问题

在灌溉农业区,基本均认为存在潜在 NO_3^- -N淋失的风险^[26], NO_3^- -N淋洗是土壤氮素损失的一个重要的途径^[27]。在灌溉的影响下,即使是低氮水平, NO_3^- -N也存在淋出2 m土体的可能性^[27];灌溉农业中的小麦玉米轮作体系中超过 50% 的 NO_3^- -N累积在 $2 \sim 4 \text{ m}$ 土层中^[19];杨学云等^[10]研究发现,施氮量 120 kg hm^{-2} 时在 400 cm 土层处 NO_3^- -N的含量接近或超过 10 mg kg^{-1} 。雨养农业不同于灌溉农业,本研究区域处于典型的黄土高原雨养农业区。本研究中,土壤全氮、碱解氮、 NH_4^+ -N在 40 cm 以下土层时,几乎不受施肥制度的影响。除N处理外,其他处理在 40 cm 以下时, NO_3^- -N也保持在相对稳定的较低水平。N处理中, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层内始终保持较高的 NO_3^- -N水平,因此N处理的 NO_3^- -N应当有继续向 100 cm 以下运移的可能。虽然袁新民等^[19]的研究认为,旱作条件下 95% 的土壤 NO_3^- -N累积 $0 \sim 2 \text{ m}$ 土层中且 $0 \sim 1 \text{ m}$ 土层约占

70%~75%, 向2 m以下运移的风险较小, 但郭海英等^[28]的研究指出, 陇东旱塬土壤储水主要分布在2 m土层, 即2 m为土壤水库下限深度。因此, 虽然本试验完全依靠自然降水, 今后也应继续开展深度至200 cm左右的研究工作, 以明确雨养农业中的氮素下移规律。

陇东旱塬土层深厚, 加上土壤水库下限的限制以及季节性降水丰富的因素, 还要高度关注本地区深层土壤氮素的生物有效性和氮素的反硝化损失。有研究认为, 2.5 m地下的 NO_3^- -N可以被作物吸收利用, 根系的深层生长对于作物氮吸收十分重要^[4], 因此, 深层土壤无机氮(主要是 NO_3^- -N)也是重要的养分源。旱地土壤的反硝化损失也十分重要。一般来说, 施氮量增加, 反硝化损失量加大^[29]; 但过高 NO_3^- -N投入则可能抑制反硝化菌生长^[30]。Lalisse-Grundmann等^[31]研究认为 NO_3^- -N浓度为36 mg kg⁻¹处理的反硝化损失量最高。本研究中, 夏闲期M及MNP处理耕层土壤的 NO_3^- -N分别为29.8 mg kg⁻¹和47.9 mg kg⁻¹。

本研究以及其他研究均发现不同施肥会改变土壤氮库时空分布, 并且有机肥和无机氮肥的表现不同。从本试验对土壤铵态氮/硝态氮比值的分析结果来看, 施肥尤其是有机肥投入加大了0~40 cm土层 NH_4^+ -N向 NO_3^- -N的转化趋势, 秸秆配施氮磷化肥有提高 NH_4^+ -N占比的趋势; 夏闲期各处理铵硝比随土层加深逐渐加大, 最大值出现的土层较孕穗期更深, 表明随土层加深 NH_4^+ -N向 NO_3^- -N转化的驱动力下降, 且不同时期转化驱动力有所差异。不同施肥引起土壤氮库等特征的实质是影响土壤氮循环的微生物过程。在我国西北地区, 虽然已有少量相关机制的研究报道^[32], 但未见更深层次的理论探究, 有必要进一步剖析长期不同施肥制度下的土壤氮素转化特征, 揭示其响应不同施肥制度的微生物学机制, 而本研究所取得的试验结果则为今后开展类似研究提供了重要线索。

4 结 论

陇东旱塬雨养条件下, 长期不同施肥处理后的农田土壤氮素状况差异明显。单施有机肥及有机肥配施氮磷处理的0~40 cm土壤氮素营养状况明显改善, 其中0~20 cm土壤全氮平均较36年前提高了26.2%; 秸秆还田配施氮磷对全氮影响不大但碱

解氮含量明显提高; 氮磷配施及单施氮肥的土壤全氮及碱解氮均处于较低水平, 耕层土壤全氮较36年前分别降低了13.1%和6.4%。两个施用有机肥处理0~40 cm土层土壤 NO_3^- -N含量大幅高于其他处理, 单施氮肥下的0~100 cm剖面 NO_3^- -N分布均匀且含量相对较高, 其他处理中下土层相对较低。施肥尤其是有机肥降低了表层土壤的铵态氮/硝态氮比值, 秸秆配施氮磷化肥有提高 NH_4^+ -N占比的趋势。结果说明有机肥培育土壤氮库的效果显著, 氮磷化肥配合、氮磷与有机肥配施可降低 NO_3^- -N淋失风险。

参 考 文 献

- [1] MacDonald A J, Powlson D S, Poulton P R, et al. Unused fertilizer nitrogen in arable soils: Its contribution to nitrate leaching. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, 46: 407—419
- [2] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤 NO_3^- -N累积的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 197—200
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, et al. Effect of organic manure on soil nitrate nitrogen accumulation (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3): 197—200
- [3] 沈其荣. 土壤肥料学通论. 北京: 高等教育出版社, 2008
Shen Q R. General introduction to soil and fertilizer science (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2008
- [4] Kristensen H L, Thorup-Kristensen K. Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 529—537
- [5] Kristensen H L, Thorup-Kristensen K. Uptake of ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2~2.5 meters depth. *Plant and Soil*, 2004, 265: 93—100
- [6] 赵聪, 曹莹菲, 刘克, 等. 长期不同施肥对壤土氮素分布的影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1375—1381
Zhao C, Cao Y F, Liu K, et al. Effects of long-term different fertilization on the nitrogen distribution in Manural Loessial Soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1375—1381
- [7] 彭令发, 郝明德, 来璐, 等. 黄土旱塬区长期施氮对土壤剖面养分分布的影响. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1475—1478
Peng L F, Hao M D, Lai L, et al. Effect of long-

- term applying nitrogen fertilizer on the distribution of nutrients of soil profiles in arid highland of the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23 (8): 1475—1478
- [8] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理. *生态学报*, 2003, 23 (10): 2041—2049
- Wu J S, Guo S L, Dang T H. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10): 2041—2049
- [9] 袁新民, 杨学云, 同延安, 等. 不同施氮量对土壤 NO_3^- -N 累积的影响. *干旱地区农业研究*, 2001, 19 (1): 8—13
- Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A, et al. Effect of N-fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19 (1): 8—13
- [10] 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. *植物营养与肥料学报*. 2001, 7 (2): 134—138
- Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of NO_3^- -N in soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7 (2): 134—138
- [11] 樊廷录, 周广业, 王勇, 等. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦—玉米轮作制长期定位施肥的增产效果. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (2): 127—131
- Fan T L, Zhou G Y, Wang Y, et al. Long-term fertilization on yield increase of winter wheat-maize rotation system in Loess Plateau dryland of Gansu (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10 (2): 127—131
- [12] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (6): 1273—1279
- Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Effect of fertilization on fertility and nitrate accumulation of black loessial soil of dry land in Loess Plateau (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (6): 1273—1279
- [13] 鲁彩艳, 牛明芬, 陈欣, 等. 不同施肥制度培育土壤氮矿化势与供氮潜力. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26 (5): 773—775
- Lu C Y, Niu M F, Chen X, et al. Nitrogen mineralization potentials of meadow brown soil in different fertilization practice (In Chinese). *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26 (5): 773—775
- [14] 李树山, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (6): 1185—1193
- Li S S, Yang J C, Jiang H M, et al. Effects of organic and inorganic fertilizer on nitrogen pool and distribution of residual N fractions in Fluvoaquic soil under the winter wheat system (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (6): 1185—1193
- [15] 党廷辉, 郭胜利, 樊军, 等. 长期施肥条件下黄土旱塬土壤 NO_3^- -N 的淋溶分布规律. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1265—1268
- Dang T H, Guo S L, Fan J, et al. NO_3^- -N leaching and distribution in soil profile in dry highland of Loess Plateau under long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1265—1268
- [16] 杨孔雀, 郝明德, 臧逸飞, 等. 黄绵土长期定位试验中硝态氮剖面分布特征. *西北农业学报*, 2011, 20 (5): 176—180
- Yang K Q, Hao M D, Zhang Y F, et al. Effect of long-term located fertilization on NO_3^- -N accumulation in the profile of Loessial Soil (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20 (5): 176—180
- [17] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦—玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (1): 65—73
- Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (1): 65—73
- [18] 党廷辉, 郭胜利, 郝明德. 黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究. *水土保持研究*, 2003, 10 (1): 58—60, 75
- Dang T H, Guo S L, Hao M D. The amount and ratio of NO_3^- -N accumulation under long-term fertilization in dry highland of Loess Plateau (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10 (1): 58—60, 75
- [19] 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. *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 (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6 (4): 397—403
- [20] 张慧霞, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期施肥对旱地土壤剖面硝态氮分布和累积的影响. *山西农业科学*, 2014, 42 (5): 465—469

- Zhang H X, Zhou H P, Yang Z X, et al. Effect of long-term fertilization to distribution and accumulation of NO_3^- -N in dryland soil (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42 (5): 465—469
- [21] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响. *土壤*, 2007, 39 (5): 782—786
- Sun X, Liu Q, Wang D J, et al. Effect of long-term application of straw on soil fertility (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (5): 782—786
- [22] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 长期秸秆还田对黑土碳氮及玉米产量变化的影响. *玉米科学*, 2011, 19 (6): 105—107, 111
- Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effect of long-term straw returning field on the carbon and nitrogen in black soil and maize yield (In Chinese). *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19 (6): 105—107, 111
- [23] 赵伟, 梁斌, 周建斌. 施入 ^{15}N 标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 587—596
- Zhao W, Liang B, Zhou J B. Residual of applied ^{15}N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 587—596
- [24] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (4): 898—905
- Ma L, Yang L Z, Xiao H A, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soils in subtropical China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (4): 898—905
- [25] 杨振兴, 周怀平, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地土壤硝态氮分布与累积的影响. *华北农学报*, 2013, 28 (3): 179—182
- Yang Z X, Zhou H P, Guan C L, et al. Effect of long-term straw returning on distribution and accumulation of nitrate nitrogen in dryland soil (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28 (3): 179—182
- [26] 李虎, 王立刚, 邱建军. 传统施肥下农田土壤氮素累积特征研究. *中国农学通报*, 2011, 27 (27): 141—147
- Li H, Wang L G, Qiu J J. Research on the soil nitrogen accumulation characteristics under traditional fertilization in crop fields (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (27): 141—147
- [27] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究——I. 冬小麦. *生态学报*, 2001, 21 (11): 1782—1789
- Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (11): 1782—1789
- [28] 郭海英, 赵建萍, 韩涛, 等. 陇东黄土高原土壤干旱特征分析. *土壤通报*, 2007, 38 (5): 873—877
- Guo H Y, Zhao J P, Han T, et al. Soil arid characteristic on Loess Plateau in East of Gansu Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (5): 873—877
- [29] De Klein C A M, van Logtestijn R S P. Denitrification in the top soil of managed grasslands in the Netherlands in relation to soil type and fertilizer level. *Plant and Soil*, 1994, 163: 33—44
- [30] Weier K L, MacRae I C, Myers R J K. Denitrification in a clay soil under pasture and annual crop: Estimation of potential losses using intact soil cores. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25: 991—997
- [31] Lalissee-Grundmann G, Brunel B, Chalamet A. Denitrification in a cultivated soil: Optimal glucose and nitrate concentrations. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20 (6): 839—844
- [32] 李晨华, 贾仲君, 唐立松, 等. 不同施肥模式对绿洲农田土壤微生物群落丰度与酶活性的影响. *土壤学报*, 2012, 49 (3): 567—574
- Li C H, Jia Z J, Tang L S, et al. Effect of model of fertilization on microbial abundance and enzyme activity in oasis farmland soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (3): 567—574

Effects of Long-term Fertilization on Soil Nitrogen under Rainfed Farming in Loess Plateau of East Gansu

WANG Ting^{1, 2} LI Lili³ ZHOU Haiyan³ DING Ningping³ CHE Zongxian¹

(¹ Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730070, China)

(² Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

(³ Pingliang Institute of Agricultural Science, Pingliang, Gansu 744000, China)

Abstract The Loess Plateau of East Gansu is a typical area where rainfed farming prevails. To understand effects of long-term fertilization on soil nitrogen in soil profile is something very meaningful to farmers in doing fertilization in this area and to researchers in enriching scientific knowledge of soil nitrogen nutrition as well. From wheat fields of a long-term fertilization experiment that started in 1978 and had six treatments, i.e., no fertilizer (CK), nitrogen only (N), nitrogen and phosphorous (NP), nitrogen and phosphorous combined with straw return (SNP), manure only (M), nitrogen and phosphorous combined with manure (MNP), soil samples were collected during the booting and summer fallow stages of wheat in 2014 for analysis of soil total nitrogen (total-N), soil available nitrogen (ava-N), soil mineral nitrogen (min-N) and composition of min-N. Results showed that treatments M and MNP obviously improved soil nitrogen nutrition and were significantly higher than the other treatments in total-N, ava-N, min-N in the 0~40 cm soil layers. No big difference in soil total-N was found between the two treatments. They both increased soil total N by 26.2% on averagely in the 0~20 cm soil layer over the original value in the year of 1978 when the experiment started. Treatment SNP was higher in total-N and ava-N than CK but significantly lower than treatments M and MNP. However, total-N in treatment SNP remained almost the same as or was just slightly higher than the original value. Though treatment NP was quite low in total-N and ava-N, it was still higher than treatments N and CK. Treatments N and NP were 13.1% and 6.4%, respectively, lower than the original value in total-N of the 0~20 cm soil layer. The treatments did not vary much in absolute value of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the soil profiles, but treatment N stood out in $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration throughout the 0~100 cm soil profile, while the other treatments were higher in the topsoil and sub-topsoil layers than in the 40~100 cm or 60~100 cm soil layer. All the fertilization treatments, particularly treatments M and MNP, lowered $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratio in the topsoil layer. Treatment SNP tended to increase the proportion of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in soil total N and hence $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratio in the middle and lower soil layers. The phenomenon was getting more significant with soil depth in the profile during the summer fallow season. To sum up, under rainfed farming in the Loess Plateau of East Gansu, the practices of applying NP in combination with organic manures are superior to the others in building up soil fertility. The application of N or NP only fails to maintain balance of total-N in the soil. The application of chemical nitrogen alone aggravates downward leaching of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, while the practices of manure, NP and NP plus manure application are proved to be able to reduce $\text{NO}_3^-\text{-N}$ leaching. However, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is not much affected by fertilization practices. Fertilization changes composition of

min-N, but the effects of manure application and straw incorporation differ quite sharply. It is, therefore, suggested that more efforts should be dedicated to the study on fate and transformation of soil nitrogen under rainfed farming in future.

Key words Long-term experiment; Different fertilization practices; Soil nitrogen characteristic; Loess Plateau of East Gansu

(责任编辑：檀满枝)