

不同水氮耦合管理下耕层土壤的氮动态*

陈 林^{1,2} 张佳宝^{1†} 赵炳梓¹ 黄 平³

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘 要 以中国科学院封丘农业生态试验站水氮耦合长期试验地为研究平台, 采集了不同水氮耦合管理下耕层 0~10 cm、10~20 cm 和 0~20 cm 土壤, 测定了六种形态的氮(无机氮、有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮、溶解性有机氮和微生物生物量氮)和三种与氮周转密切相关的生物性指标(脲酶活性、蛋白酶活性和硝化势)。三因素方差分析结果表明, 施氮和耕层深度对六种形态氮均有显著作用, 而灌水对这六种形态氮无显著作用。单因素方差分析结果显示施氮明显提高了耕层 0~20 cm 土壤无机氮、有机氮、脲酶活性及硝化势, 而对土壤酸解有机氮和酸解铵态氮无显著影响; 六种形态的氮、蛋白酶活性及硝化势均不受灌水量的影响。不同水氮耦合管理下耕层 0~10 cm 土壤六种形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势几乎均明显地高于 10~20 cm 土壤。通过对不同水氮耦合管理下耕层土壤氮动态的研究, 本研究得出最佳的水氮耦合管理模式是灌水至 20 cm 土层的田间持水量和每季施氮 190 kg hm⁻²。

关键词 水氮耦合; 耕层土壤; 氮动态

中图分类号 S158.2 **文献标识码** A

外源氮的长期施用对作物及农田土壤质量的影响, 一直是农业可持续生产研究的主要和热点问题。外源氮投入在农业生产中非常重要, 其不仅能促进作物生长还能提高粮食产量, 而且对土壤不同形态氮的动态也有重要影响^[1]。

土壤的氮动态受到多种农业管理方式的影响。(1)耕作措施: 长期耕作后土壤全氮明显下降, 但其氮素形态分布与未开垦耕作土壤无明显差异, 各种形态氮处于动态平衡中^[2]; (2)施肥措施: 与单施无机肥相比, 无机、有机肥配施显著提高土壤矿化氮和微生物生物量氮含量^[3]; (3)灌溉方式: 在 0~10 cm 土层, 以滴灌为灌溉方式的土壤易矿化有机氮含量高于沟灌和渗灌, 滴灌更利于表层土壤易矿化有机氮的形成^[4]; (4)种植模式: 不同种植模式下, 某些形态氮的含量存在明显差异, 例如与连续种植玉米相比, 玉米-燕麦-苜蓿轮作提高了土壤碱解氮含量和氮矿化势^[5]; (5)土壤本身理化性质: 土壤本身理化性质对氮形态及含量的影响也很大, 例如酸性土壤, 因其 pH 较低, 氨不易挥发, 硝化作用弱使得土壤无机氮主要以铵态氮形态存在, 避免硝态氮淋溶

或径流损失, 有利于土壤无机氮的持留^[6]。

不同作物管理模式下施氮对土壤氮动态的影响研究已有大量报道^[7-11], 而水分和氮素的耦合效应往往被忽视。合理的水氮耦合管理不但能为作物生长起到很好的协同作用^[12], 而且能降低硝酸盐积累、降低硝化反硝化过程中氮氧化物的排放来减少土壤氮素流失^[13]。因此研究长期不同水氮耦合管理下土壤的氮动态并进一步筛选出最佳的水氮耦合管理模式对农业可持续生产有着重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

不同水氮耦合试验位于河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态试验站(114°24'E, 35°01'N), 该区域气候属半干旱、半湿润的暖温带季风气候, 年平均温度 13.9℃, 全年降雨量在 615 mm 左右, 蒸发量约 1 875 mm, 全年日照时数 2 300~2 500 h。该区域土壤起源于黄河冲积沉积物, 属于典型的碱性砂质壤土, 土壤基本性质见表 1。

* 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2011CB100506)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX2-EW-N-08)资助

† E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介: 陈 林(1987—), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 主要从事不同管理模式土壤微生物研究。E-mail: lchen@issas.ac.cn

收稿日期: 2012-06-27; 收到修改稿日期: 2012-09-27

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basal properties of the studied soil

深度 Depth (cm)	pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm h ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)
0~30	8.28	1.51	22.6	7.88	10.2	45.6	40.7	13.7
30~80	8.48	1.48	19.3	14.35	7.1	8.4	55.8	35.9
80~180	8.95	1.42	18.1	5.27	3.2	7.3	82.4	10.3

1.2 试验设计

田间试验始于 2005 年玉米季,施氮梯度为每个作物季施氮 0(N0)、150(N1)、190(N2)、230(N3)和 270 kg hm⁻²(N4),每个施氮处理下设置三个灌水处理,即分别灌溉至 20(W1)、40(W2)和 60 cm(W3)土层的田间持水量,每个水氮耦合处理设置 3 个重复。试验用随机排列的小区设计,小区面积 48 m²(8 m×6 m),实验地四周设置宽 1 m 的保护行,小区间用水泥板(宽 10 cm,深 100 cm)隔开。

种植方式为冬小麦和夏玉米轮作。小麦品种为郑麦 9023,其为弱春性品种,苗壮、分蘖力中等、成穗率高,每亩成穗率 35 万株左右,全生育期约 230 d,是当地种植面积最大的品种之一。玉米品种为郑单 958,属早熟品种,株形紧凑,株高 246 cm

左右,根深可达 200 cm,穗长 110 cm 左右,为当地广为种植的品种之一。

氮肥来源于尿素(含氮量 46.3%),分基肥和追肥两次施用,其中小麦基施 40%,其余 60% 作为追肥于返青期施用;玉米基施 60%,其余 40% 作为追肥于大喇叭口期施用。磷肥为重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46.1%),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 49.6%),磷钾肥每季一次性随氮肥基施,磷肥为 80 kg hm⁻²,钾肥为 200 kg hm⁻²。基肥均匀施入后土壤翻耕至 20 cm,小麦季追肥后立即灌溉,玉米季追肥后如果无降水或降雨量低于 20 mm 立即灌溉。灌溉前分别取 W1、W2、W3 处理的 20 cm、40 cm、60 cm 土柱测定土壤含水量,根据田间持水量与土壤含水量的差值算出每个小区的灌水量,灌溉日期及灌溉量见表 2。

表 2 水分管理的灌溉日期及灌溉量

Table 2 Dates and rates of irrigation for water management

作物季 Crop season	灌溉日期 Irrigation date (yyyy-mm-dd)	灌溉量 Irrigation rate (mm)		
		W1	W2	W3
2007-2008 小麦 Wheat	2007-10-08	16.7	16.7	16.7
	2008-03-03	34.0	67.1	86.3
	2008-04-01	34.2	64.2	81.5
2008 玉米 Maize	2008-06-25	38.3	72.7	99.6
2008-2009 小麦 Wheat	2009-02-01	18.8	18.8	18.8
	2009-03-03	29.4	62.9	82.1
	2009-04-18	41.7	81.2	108.3
2009 玉米 Maize	2009-06-30	41.7	66.7	83.3
2009-2010 小麦 Wheat	2009-10-10	20.8	20.8	20.8
	2010-03-04	33.3	66.7	87.5
	2010-04-02	31.3	62.5	83.3
	2010-05-12	33.3	62.5	83.3
	2010-06-14	20.8	20.8	20.8
	2010 玉米 Maize	2010-06-25	41.7	41.7
2011 小麦 Wheat	2010-07-25	20.8	41.7	62.5
	2011-03-05	20.8	45.8	72.9
	2011-04-10	29.2	66.7	91.7
	2011-05-09	31.3	75.0	91.7
2011 玉米 Maize	2011-06-07	20.8	20.8	20.8
	2011-06-30	31.3	31.3	31.3
	2011-07-24	33.8	72.1	100.8

1.3 土壤采集与分析

封丘地区地下水位常年在 100 cm 以下,不考虑地下水对灌溉后 0~60 cm 土层的影响。尿素施入后随土翻耕至土层 0~20 cm,为了研究长期不同灌溉量下耕层不同施氮土壤的氮动态和氮素储备情况,本研究只采集耕层 0~20 cm 土壤。

不同水氮耦合管理下耕层 0~10 cm、10~20 cm、0~20 cm 土壤采集于 2011 年 9 月玉米收获以后。每个小区对角线上随机采集的土样在去除明显的植物残体和石块后过 2 mm 筛。过筛土样分成两部分,一部分风干后测定无机氮、有机氮、溶解性有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮,一部分于 4℃ 保存用于微生物生物量氮、脲酶活性、蛋白酶活性和硝化势的测定。

无机氮(Inorganic N-IN)用 Skalar SAN^{plus} 流动分析仪测定,溶解性有机氮(Dissolved organic N-DON)用 Multi C/N 3100 分析仪(Aanalytik Jena AG, Germany)测定,有机氮(Organic N-ON)用凯式定氮法测定^[13],酸解有机氮(Acidolytic organic N-AON)和酸解铵态氮(Acidolytic ammonium N-AAN)用酸水解-蒸馏法测定^[14],微生物生物量氮(Microbial biomass N-MBN)用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定^[15],浸提矫正因子 $k_{EN} = 0.54$ ^[16]。

脲酶活性(Urease activity-URE)的测定参照 Zan-tua 和 Bremner 的方法^[17],蛋白酶活性(Protease activity-PRO)用 Geisseler 和 Horwath 的方法测定^[18],硝化势(Nitrification potential-NP)用 Schmidt 等的方法测定^[19]。

1.4 统计分析

对不同水氮耦合管理下耕层 0~10 cm、10~20 cm 土壤的六种形态氮作三因素方差分析,研究施氮、灌水、耕层深度及他们的交互对六种形态氮的作用。对耕层 0~20 cm 土壤不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势作单因素方差分析,研究施氮量和灌水量对他们的影响。不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势之间的相关性用泊松相关性检验。所有分析均采用 SPSS 16.0 统计分析软件。

2 结 果

2.1 施氮、灌水及耕层深度对土壤不同形态氮的作用

水氮耦合试验已开展了六年,耕层两种深度下六种形态氮的三因素方差分析结果表明:施氮对六种形态氮均有显著作用,尤其对无机氮、有机氮、微生物生物量氮在 $p < 0.001$ 有显著作用并依次解释了 53%、72%、29% 的变异;耕层深度对六种形态氮

均有极显著作用($p < 0.001$),并顺序解释了无机氮 68%、有机氮 98%、溶解性有机氮 71%、酸解有机氮 79%、酸解铵态氮 80%、微生物生物量氮 38% 的变异;灌水对除有机氮和酸解铵态氮的其他形态氮均无显著作用;灌水或耕层深度与施氮对除微生物生物量氮的其他形态氮均有不同程度的交互作用,灌水与耕层深度对无机氮、有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮也有不同程度的交互作用(表 3)。

无论何种水氮耦合管理,耕层 0~10 cm 土壤的六种形态氮均明显高于 10~20 cm 土壤。两种剖面下六种形态氮的大小顺序均为:有机氮 > 酸解有机氮 > 酸解铵态氮 > 微生物生物量氮 > 无机氮 > 溶解性有机氮。土壤无机氮、有机氮、酸解铵态氮、溶解性有机氮在两种耕层深度下均保持较稳定状态,酸解有机氮和微生物生物量氮在不同水氮耦合间的变化幅度较大且无规律性变化趋势(图 1)。施氮显著增加了耕层 0~20 cm 土壤无机氮和有机氮,增幅分别在 7.6%~15.6% 和 5.1%~6.7%。未施氮耕层 0~20 cm 土壤溶解性有机氮与施氮 150 kg hm⁻² 土壤无明显差异,而显著高出施氮大于 150 kg hm⁻² 土壤 15.3%~19.9%。耕层 0~20 cm 土壤酸解有机氮和酸解铵态氮均不受施氮量的影响,施氮 270 kg hm⁻² 土壤微生物生物量氮显著高出未施氮土壤 23.3% 和施氮 150 kg hm⁻² 土壤 15.7%。灌水量对耕层 0~20 cm 土壤六种形态氮均无显著影响(表 4)。

2.2 不同水氮耦合管理下耕层土壤脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势

不论何种水氮耦合管理,耕层 0~10 cm 土壤脲酶活性明显高于 10~20 cm 土壤。耕层 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤脲酶活性在不同水氮耦合间无规律性变化趋势(图 2a)。施氮显著提高了耕层 0~20 cm 土壤脲酶活性(增幅达 16.0%~18.0%),灌溉至 60 cm 土层田间持水量的土壤脲酶活性稍低于灌溉至 20 cm 和 40 cm 土层田间持水量的土壤(表 4)。

两种耕层深度下蛋白酶活性均很低。除 NOW1、NOW3、N4W2、N4W3 外,耕层 0~10 cm 土壤蛋白酶活性要高于 10~20 cm 土壤。除未施氮耕层 0~10 cm 土壤,施氮土壤灌溉至 20 cm 土层田间持水量的蛋白酶活性明显高于灌溉至 40 cm 和 60 cm 土层田间持水量的土壤。耕层 0~10 cm 土壤蛋白酶活性随施氮量的增加有先升高后降低的趋势,而在 10~20 cm 土壤蛋白酶活性随施氮量的增加无明显变化趋势(图 2b)。耕层 0~20 cm 土壤蛋白酶活性不受灌水量的影响(表 4)。

表 3 六种形态氮的三因素方差分析

Table 3 Three-way analysis of variance of six forms of nitrogen

因素 Factors	F 值 F values						显著性水平 Significant levels						作用评估值 Estimates of effect size					
	IN	ON	DON	AON	AAN	MBN	IN	ON	DON	AON	AAN	MBN	IN	ON	DON	AON	AAN	MBN
氮 Nitrogen	17.2	39.0	4.6	3.6	2.8	6.0	***	***	**	*	*	***	0.53	0.72	0.24	0.20	0.16	0.29
水 Water	0.6	4.6	1.1	2.6	3.6	0.4	*	*	*	*	*	*	0.02	0.13	0.04	0.08	0.11	0.01
深度 Depth	128.1	2 455.5	144.2	222.4	246.9	37.3	***	***	***	***	***	***	0.68	0.98	0.71	0.79	0.80	0.38
氮 × 水 Nitrogen × water	5.4	2.3	3.1	4.9	3.9	1.9	***	*	**	***	***	***	0.42	0.24	0.29	0.40	0.34	0.20
氮 × 深度 Nitrogen × depth	2.8	7.8	4.8	4.3	2.9	0.6	*	***	**	**	*	*	0.16	0.34	0.24	0.22	0.16	0.04
水 × 深度 Water × depth	6.0	3.2	1.2	6.3	3.9	1.2	**	*	**	**	*	*	0.17	0.10	0.04	0.17	0.12	0.04
氮 × 水 × 深度 Nitrogen × water × depth	3.2	5.2	2.1	4.5	2.8	2.0	**	***	*	***	*	*	0.30	0.41	0.22	0.37	0.27	0.21

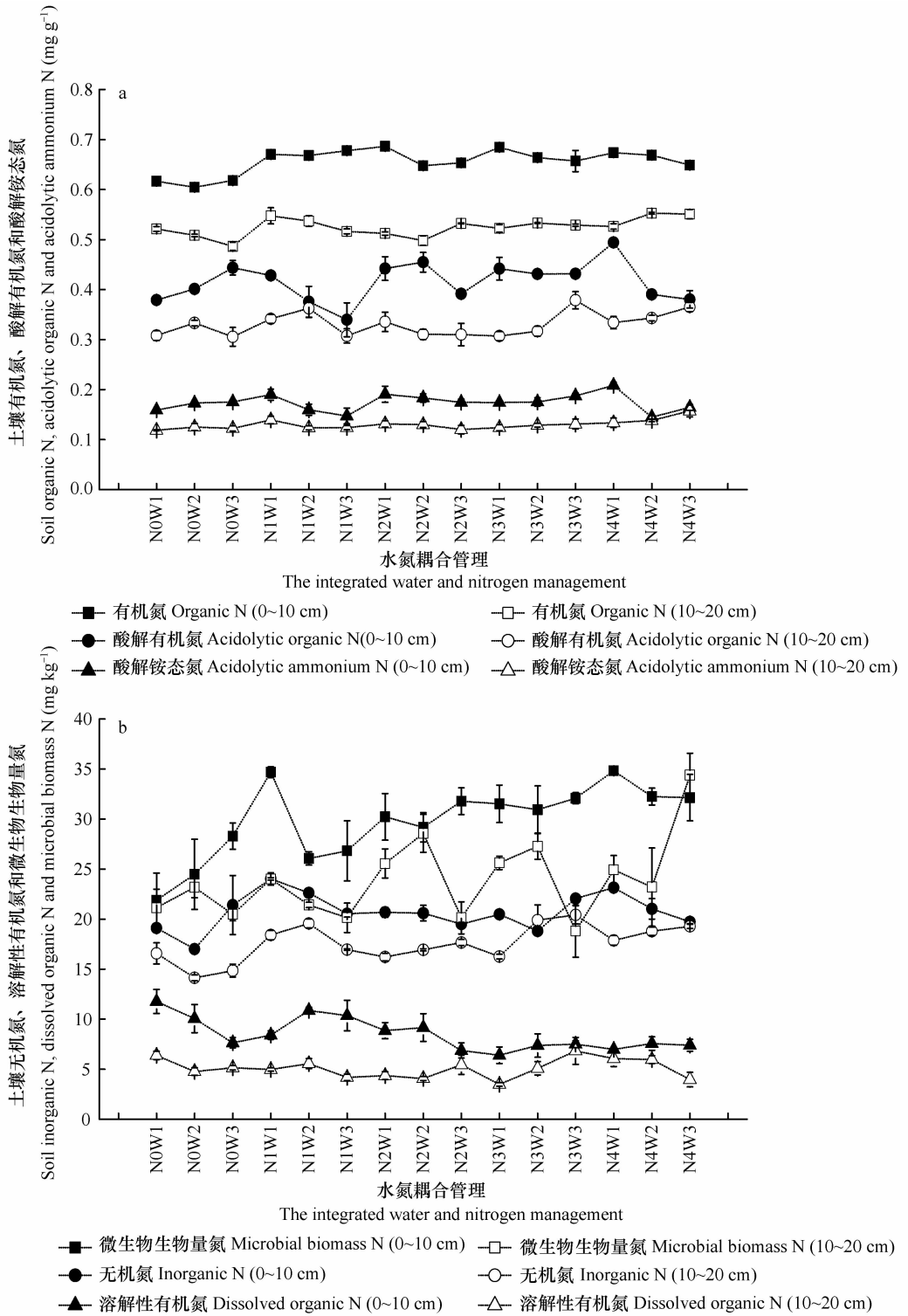
注: IN、ON、DON、AON、AAN、MBN 依次表示土壤无机氮、有机氮、溶解性有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮、微生物生物量氮; *、**、*** 分别表示 5%、1%、1‰ 水平上的显著性作用 Note: IN, ON, DON, AON, AAN and MBN denotes inorganic N, organic N, dissolved organic N, acidolytic organic N, acidolytic ammonium N and microbial biomass N, respectively; *, ** and *** stands for $p < 0.05, 0.01$ and 0.001 significant effect, respectively

表 4 耕层 0~20 cm 施氮和灌水处理下各参数的单因素方差分析

Table 4 One-way analysis of variance of measured parameters in the 0~20 cm topsoil in different nitrogen and water treatments

处理 Treatments	无机氮 Inorganic N (mg kg ⁻¹)	溶解性有机氮 Dissolved organic N (mg kg ⁻¹)	有机氮 Organic N (mg g ⁻¹)	酸解有机氮 Acidolytic organic N (mg g ⁻¹)	酸解铵态氮 Acidolytic ammonium N (mg g ⁻¹)	微生物生物量氮 Microbial biomass N (mg kg ⁻¹)	脲酶活性 Urease activity (NH ₄ -N mg g ⁻¹ d ⁻¹)	蛋白酶活性 Protease activity (Tyrosine mg g ⁻¹ d ⁻¹)	硝化势 Nitrification potential (NO ₃ -N mg kg ⁻¹ d ⁻¹)
N0	17.18 ± 1.85 a	7.63 ± 1.56 c	0.56 ± 0.01 a	0.36 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 a	23.24 ± 2.52 a	3.37 ± 0.29 a	0.03 ± 0.01 a	26.94 ± 5.73 a
N1	20.35 ± 1.25 c	7.39 ± 1.11 bc	0.60 ± 0.01 c	0.36 ± 0.04 a	0.15 ± 0.02 a	25.52 ± 3.48 ab	4.00 ± 0.32 b	0.04 ± 0.01 a	53.07 ± 6.18 b
N2	18.60 ± 0.52 b	6.46 ± 0.84 ab	0.59 ± 0.01 b	0.37 ± 0.02 a	0.15 ± 0.01 a	27.57 ± 3.01 bc	4.09 ± 0.28 b	0.06 ± 0.02 b	55.64 ± 4.69 b
N3	19.65 ± 1.50 bc	6.11 ± 1.27 a	0.60 ± 0.01 bc	0.38 ± 0.02 a	0.15 ± 0.01 a	27.71 ± 2.70 bc	4.05 ± 0.25 b	0.04 ± 0.01 a	57.33 ± 5.38 b
N4	19.97 ± 0.55 c	6.33 ± 0.60 ab	0.60 ± 0.02 c	0.38 ± 0.03 a	0.16 ± 0.01 a	30.29 ± 5.35 c	4.05 ± 0.29 b	0.03 ± 0.01 a	56.83 ± 4.52 b
W1	19.28 ± 1.46 a	6.77 ± 1.50 a	0.60 ± 0.02 a	0.38 ± 0.03 a	0.16 ± 0.02 a	27.44 ± 3.33 a	4.06 ± 0.43 b	0.04 ± 0.02 a	49.44 ± 9.90 a
W2	18.94 ± 2.03 a	7.05 ± 1.09 a	0.59 ± 0.02 a	0.37 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 a	26.65 ± 3.69 a	3.97 ± 0.26 ab	0.04 ± 0.02 a	49.93 ± 13.03 a
W3	19.24 ± 1.53 a	6.54 ± 1.11 a	0.59 ± 0.02 a	0.37 ± 0.03 a	0.15 ± 0.01 a	26.50 ± 5.37 a	3.71 ± 0.39 a	0.04 ± 0.01 a	50.51 ± 15.68 a

注: N0、N1、N2、N3、N4 分别表示施氮 0、150、190、230、270 kg hm⁻²; W1、W2、W3 分别表示灌溉至 20、40、60 cm 土层的田间持水量; 同列不同字母表示 5% 水平上的显著性差异 Note: N0, N1, N2, N3 and N4 denotes nitrogen fertilization rate at 0, 150, 190, 230 and 270 kg hm⁻², respectively, and W1, W2 and W3 denotes irrigation rate to meet the field water-holding capacity of the 0~20, 0~40 and 0~60 cm top-soil layer, respectively; the different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ based on Duncan's test



注: N0、N1、N2、N3、N4分别表示施氮0、150、190、230、270 kg hm⁻², W1、W2、W3分别表示灌溉至20、40、60 cm土层的田间持水量
 Note: N0, N1, N2, N3 and N4 denotes nitrogen fertilization rate at 0, 150, 190, 230 and 270 kg hm⁻², respectively, and W1, W2 and W3 denotes irrigation rate to meet the field water-holding capacity of the 0-20, 0-40 and 0-60 cm topsoil layer, respectively

图1 水氮耦合管理下耕层0~10 cm和10~20 cm土壤有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮(a)和无机氮、溶解性有机氮、微生物生物量氮(b)

Fig. 1 Organic N, acidolytic organic N, acidolytic ammonium N (a) and inorganic N, dissolved organic N, microbial biomass N (b) in the 0~10 cm, 10~20 cm topsoil related to integrated water and nitrogen management

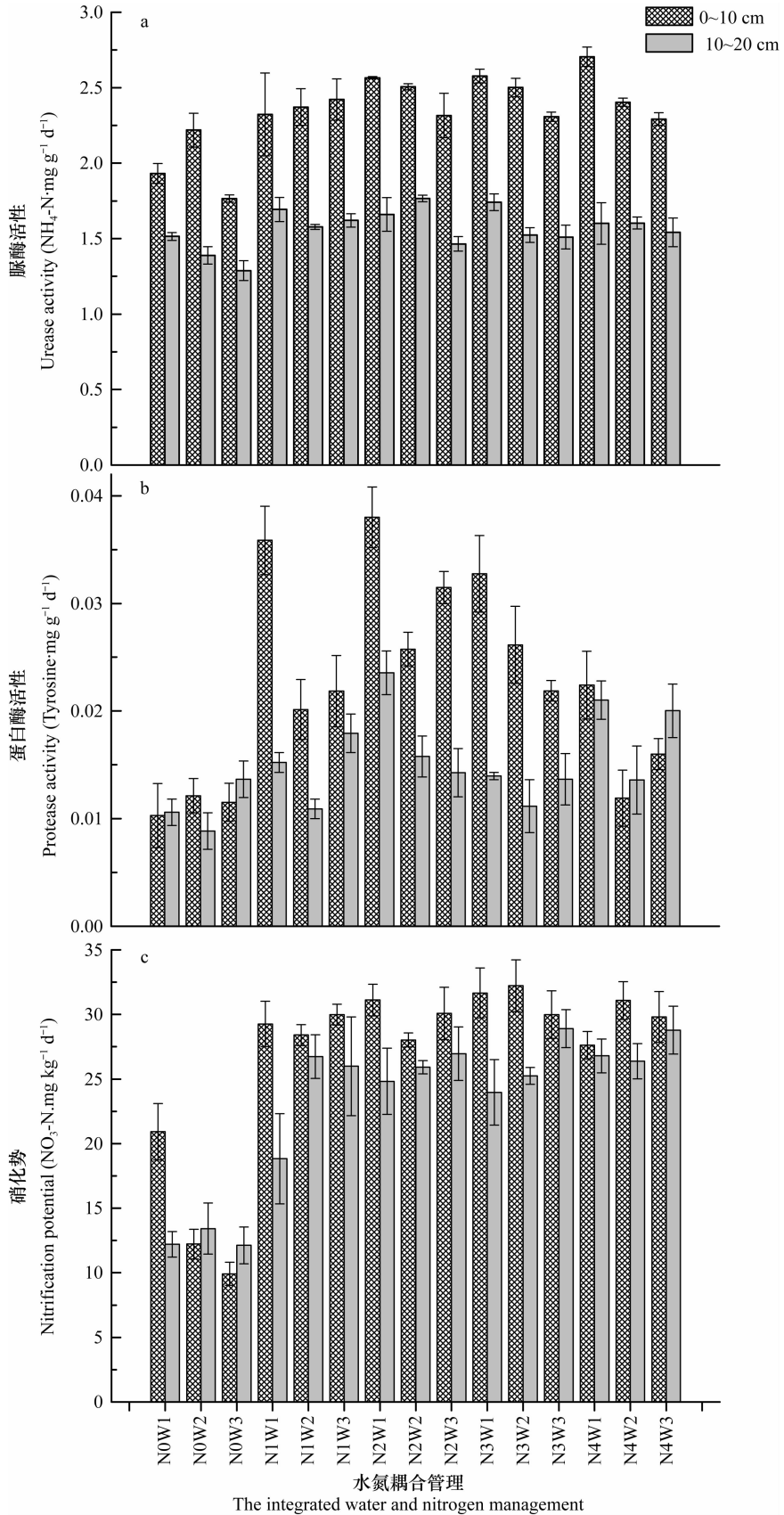


图2 水氮耦合管理下耕层0~10 cm、10~20 cm土壤脲酶活性(a)、蛋白酶活性(b)及硝化势(c)

Fig. 2 Urease activity (a), protease activity (b) and nitrification potential (c) in the 0~10 cm, 10~20 cm topsoil related to integrated water and nitrogen management

除 N0W2 和 N0W3 外,耕层 0~10 cm 土壤硝化势稍高于耕层 10~20 cm 土壤。在两种耕层深度下,施氮明显提高了土壤硝化势,而硝化势未随施氮量和灌水量的增加发生明显升高或降低趋势。耕层 0~10 cm 土壤在 N1W1~N4W3 保持着较稳定的硝化势,10~20 cm 土壤在 N1W2~N4W3 其硝化势并无明显变化(图 2c)。施氮明显提高了耕层 0~20 cm 土壤硝化势(增幅达 49.2%~53.0%),而耕层 0~20 cm 土壤硝化势不受灌水量的影响(表 4)。

3 讨 论

3.1 施氮、灌水、耕层深度对不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势的作用

三因素方差分析显示施氮对六种形态氮均有显著作用。施氮明显增加了耕层 0~20 cm 土壤无机氮、有机氮、溶解性有机氮、微生物生物量氮、脲酶活性及硝化势,而酸解有机氮和酸解铵态氮无明显增加。长期施氮对土壤不同形态氮的影响很大,大多情况下呈增加趋势,而酸解有机氮和酸解铵态

氮是用强酸(6 M HCl)降解土壤后浸提的氮,具有高稳定性,往往不受外界施氮的影响。微生物生物量氮既是氮的有效成分,又是表征微生物生物量的指标。本研究支持 Zhang 和 Zak^[20] 的研究,其研究表明在低施氮量(5 g m⁻²)下,微生物生物量氮会短暂地升高;而在高量施氮(50 g m⁻²)情况下,微生物生物量氮出现显著地升高。施氮提升土壤脲酶活性和硝化势,促进尿素氮水解为铵态氮再向硝态氮转化,增加了氮的有效性。有研究表明每年氮沉降达到 30 kg hm⁻² 的森林土壤中,其脲酶活性得到显著提升^[21]。施氮调整了土壤微生物的群落结构^[8,10],其对土壤脲酶活性和硝化势可能有一定的影响。土壤的生物性和结构性大多由土壤微生物驱动^[22],与氮动态有关的微生物酶活性可以用脲酶和蛋白酶等活性表征,硝化势在一定程度上表明了土壤氨氧化微生物的活性^[23],因此土壤脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势在某种程度上反映了与氮动态有关的土壤微生物情况。土壤脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势几乎与六种形态氮均有很好的正相关性(表 5),本研究结果也证实了与氮动态有关的微生物能驱动耕层土壤不同形态氮的变化。

表 5 耕层土壤六种形态的氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势之间的相关性

Table 5 Pearson correlations among the six forms of nitrogen, urease activity, protease activity and nitrification potential

	IN	ON	DON	AON	AAN	MBN	URE	PRO
ON	0.69 ***							
DON	0.45 ***	0.63 ***						
AON	0.60 ***	0.74 ***	0.41 ***					
AAN	0.59 ***	0.76 ***	0.46 ***	0.87 ***				
MBN	0.42 ***	0.55 ***	-0.05	0.50 ***	0.52 ***			
URE	0.57 ***	0.89 ***	0.53 ***	0.71 ***	0.75 ***	0.54 ***		
PRO	0.34 **	0.46 ***	0.28 **	0.46 ***	0.51 ***	0.33 **	0.49 ***	
NP	0.43 ***	0.44 ***	0.09	0.25 *	0.27 *	0.36 ***	0.47 ***	0.32 **

注:IN、ON、DON、AON、AAN、MBN、URE、PRO、NP 分别表示无机氮、有机氮、溶解性有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮、微生物生物量氮、脲酶活性、蛋白酶活性、硝化势;*、**、*** 分别表示 $p < 0.05$ 、 0.01 、 0.001 的显著相关性 Note: IN, ON, DON, AON, AAN, MBN, URE, PRO and NP denotes inorganic N, organic N, dissolved organic N, acidolytic organic N, acidolytic ammonium N, microbial biomass N, urease activity, protease activity and nitrification potential, respectively. *, ** and *** stands for $p < 0.05$, 0.01 and 0.001 of significant correlation, respectively

灌水量对耕层 0~20 cm 土壤不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势均无显著影响。灌水量最少为灌溉至土层 20 cm 的田间持水量,水分已经满足耕层 0~20 cm 土壤的要求,耕层 0~20 cm 土壤微生物在每个灌水处理下均能保持很好的活性。高量灌溉(W2 和 W3)的土壤耕层以下水分状况可能会影响作物对水肥的吸收,导致根系分泌物、微

生物和酶活性变化而影响的耕层氮素转化,但本研究结果并未发现灌水量对耕层氮周转的影响。土壤微生物活性、群落组成及相关酶活性明显地受到土壤水分含量的影响^[24],样品采集前有明显的降雨过程,耕层土壤保持较高的湿度,其质量含水量均在 17%~19%,样品相似的含水量也可能解释耕层土壤不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势

的很小变化。受有关微生物驱动的土壤不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势并不受灌水量的影响。有研究显示在中国北部半干旱草原生态系统中,加入外源碳后,与雨养管理模式相比,灌溉并未明显提升土壤微生物生物量及活性^[25]。耕层 0~10 cm 土壤微生物生物量及活性要高于 10~20 cm 土壤,其能解释耕层 0~10 cm 土壤不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势均明显地高于 10~20 cm 土壤。耕层 0~10 cm 土壤微生物生物量氮明显高于 10~20 cm 土壤,其在一定程度上说明了耕层 0~10 cm 土壤微生物生物量高于 10~20 cm 土壤。

3.2 最佳水氮耦合管理模式

对于耕层 0~20 cm 土壤,灌水量对不同形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势的影响并不大。灌水至 20 cm 土层田间持水量不仅能维持耕层土壤氮素储备,也能满足小麦-玉米轮作模式下作物对水分的需求。小麦生物量较小,灌水至 20 cm 土层田间持水量满足其对水分的需求,虽然玉米生物量大且根系发达,灌水至 20 cm 土层田间持水量可以满足其对水分的需求,因为每年的强降雨均发生在玉米季的重要需水期,降雨较好地补充了玉米对水分

的需求。

不同水氮耦合管理对作物产量、耕地氮素储备及硝酸盐淋失对地下水污染等方面有着重要的影响,最佳的水氮耦合管理模式不仅能满足作物产量的需要,更重要的是能较好地维持耕地氮素储备并减少硝酸盐淋失对地下水污染。耕层 0~10 cm、10~20 cm 土壤在六年不同水氮耦合管理下,除耕层 0~10 cm、10~20 cm 土壤微生物生物量氮和 0~10 cm 土壤酸解有机氮外,其他形态氮并无明显的增加或降低趋势。

筛选最佳水氮耦合管理模式还要考虑作物产量及氮利用效率,本研究对近几年不同水氮耦合管理下作物平均产量和氮肥利用效率作了详细统计(表 6)。N2W1 管理下小麦和玉米平均产量、籽粒含氮量和氮肥利用率均较高,并且其吸氮能力也保持较高水平。施氮 190 kg hm⁻² 不仅能很好地维持耕层土壤氮素储备,而且土壤脲酶和蛋白酶活性最大,其提高了作物对外源氮素的利用效率,此外,与不施氮和施氮 150 kg hm⁻² 土壤相比,施氮 190 kg hm⁻² 土壤的硝化势也较高。结合前面灌水量对耕层土壤氮动态的讨论,我们得到的最佳水氮耦合管理模式是灌水至 20 cm 土层的田间持水量和每季施氮 190 kg hm⁻²。

表 6 不同水氮耦合管理下作物平均产量和氮肥利用效率

Table 6 Average crop yield and N use efficiency related to integrated water and nitrogen management

水氮耦合管理 The integrated water and nitrogen management	作物产量 Crop yield (t hm ⁻²)		氮肥利用率 N availability (%)		作物吸氮量 Crop N content (kg hm ⁻²)		籽粒含氮量 Grain N content (g kg ⁻¹)	
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize
N0W1	1.59 ± 0.40	3.93 ± 0.30	—	—	30 ± 5	44 ± 8	15.9 ± 0.2	7.2 ± 0.5
N0W2	1.12 ± 0.50	3.73 ± 0.40	—	—	25 ± 2	42 ± 5	15.9 ± 0.4	7.2 ± 0.4
N0W3	1.33 ± 0.30	3.60 ± 0.40	—	—	25 ± 3	42 ± 3	15.7 ± 0.4	7.0 ± 0.3
N1W1	4.70 ± 0.70	8.06 ± 0.60	59.4 ± 6.0	68.4 ± 6.5	128 ± 5	141 ± 1	21.9 ± 1.1	10.6 ± 0.4
N1W2	4.74 ± 0.60	8.32 ± 0.80	60.3 ± 7.9	67.7 ± 3.9	124 ± 6	140 ± 1	21.3 ± 1.1	10.5 ± 0.2
N1W3	4.98 ± 1.20	8.25 ± 0.60	62.9 ± 7.2	66.7 ± 4.0	119 ± 9	139 ± 4	20.7 ± 1.2	10.3 ± 0.3
N2W1	4.85 ± 0.80	8.48 ± 0.60	49.9 ± 4.4	54.6 ± 4.0	128 ± 5	140 ± 2	23.1 ± 0.5	10.8 ± 0.2
N2W2	4.84 ± 0.60	8.45 ± 0.40	49.2 ± 3.7	55.8 ± 4.1	125 ± 2	144 ± 4	22.5 ± 0.6	10.5 ± 0.3
N2W3	5.20 ± 0.80	8.57 ± 0.60	58.6 ± 6.1	59.0 ± 5.2	141 ± 9	150 ± 4	22.5 ± 1.1	10.8 ± 0.4
N3W1	4.79 ± 0.80	7.91 ± 0.40	40.4 ± 7.4	42.8 ± 3.7	134 ± 4	138 ± 4	23.7 ± 1.0	10.6 ± 0.5
N3W2	4.90 ± 0.70	8.24 ± 0.60	42.6 ± 6.9	47.2 ± 4.9	131 ± 16	147 ± 10	22.8 ± 0.7	10.8 ± 0.8
N3W3	4.95 ± 0.60	8.57 ± 0.40	51.1 ± 4.8	51.1 ± 4.1	136 ± 4	155 ± 7	22.7 ± 0.1	10.8 ± 0.3
N4W1	4.83 ± 0.70	8.22 ± 0.40	39.2 ± 4.5	39.9 ± 2.3	139 ± 12	152 ± 2	23.1 ± 1.0	11.1 ± 0.1
N4W2	5.19 ± 1.00	8.21 ± 0.60	42.2 ± 6.8	39.8 ± 2.3	149 ± 16	151 ± 2	23.4 ± 0.3	11.1 ± 0.1
N4W3	5.10 ± 0.60	8.66 ± 0.50	46.9 ± 6.8	43.7 ± 3.8	148 ± 9	154 ± 6	23.6 ± 0.7	11.0 ± 0.5

4 结 论

本研究对六年不同水氮耦合管理下耕层 0 ~ 20 cm 土壤的氮动态作了详细研究,结果表明:外源氮投入明显提高了耕层 0 ~ 20 cm 土壤无机氮、有机氮、脲酶活性及硝化势,而土壤酸解有机氮和酸解铵态氮并未因施氮而发生明显改变;土壤无机氮、有机氮、溶解性有机氮、酸解有机氮、酸解铵态氮、微生物生物量氮、蛋白酶活性、硝化势均不受灌水量的影响;几乎所有水氮耦合管理下耕层 0 ~ 10 cm 土壤六种形态氮、脲酶活性、蛋白酶活性及硝化势均明显地高于 10 ~ 20 cm 土壤。通过对不同水氮耦合管理下耕层土壤氮动态的研究,本研究得出最佳的水氮耦合管理模式是灌水至 20 cm 土层的田间持水量和每季施氮 190 kg hm^{-2} 。目前最佳水氮耦合管理模式只是在封丘地区得以验证,其在黄淮海平原其他地区的应用有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778—783. Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778—783

[2] 张玉玲, 张玉龙, 虞娜, 等. 长期不同施肥措施水稻土可矿化氮与微生物量氮关系的研究. 水土保持学报, 2007, 21(4): 117—121. Zhang Y L, Zhang Y L, Yu N, et al. Study on relationship between soil mineralize nitrogen and microbial biomass nitrogen in paddy soil under long-term fertilization (In Chinese). *Journal of Water and Soil Conservation*, 2007, 21(4): 117—121

[3] 姬景红, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮矿化特性的影响. 土壤学报, 2009, 46(5): 869—877. Ji J H, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Effect of irrigation methods on mineralization of soil organic nitrogen in protected field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 869—877

[4] Russell A E, Laird D A, Mallarino A P. Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil quality in midwestern mollisols. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(1): 249—255

[5] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响. 土壤学报, 2009, 46(5): 795—801. Cai Z C, Zhao W. Effects of land use types on nitrification in humid subtropical soils of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 795—801

[6] Liu Y Y, Dell E, Yao H Y, et al. Microbial and soil properties in bentgrass putting greens: Impacts of nitrogen fertilization rates. *Geoderma*, 2011, 162(1/2): 215—221

[7] Jagadamma S, Lal R, Hoefl R G, et al. Nitrogen fertilization and

cropping systems effects on soil organic carbon and total nitrogen pools under chisel-plow tillage in Illinois. *Soil Till Res*, 2007, 95(1/2): 348—356

[8] Bardgett R D, Mawdsley J L, Edwards S, et al. Plant species and nitrogen effects on soil biological properties of temperate upland grasslands. *Funct Ecol*, 1999, 13(5): 650—660

[9] Liebig M A, Varvel G E, Doran J W, et al. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the Western Corn Belt. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(2): 596—601

[10] Wang C H, Butterbach-Bahl K, Han Y, et al. The effects of biomass removal and N additions on microbial N transformations and biomass at different vegetation types in an old-field ecosystem in Northern China. *Plant Soil*, 2011, 340(1—2): 397—411

[11] Bremner J M. Total nitrogen//Black C A. *Methods of soil analysis*. Wisconsin, USA: Am Soc Agro, 1965: 1149—1178

[12] 李生秀, 李世清. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38—46. Li S X, Li S Q. The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994, 12(1): 38—46

[13] Zhou S L, Wu Y C, Wang Z M, et al. The nitrate leached below maize root zone is available for deep-rooted wheat in winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain. *Environ. Pollut.*, 2008, 152(3): 723—730

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 152—156. Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 152—156

[15] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil-nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17(6): 837—842

[16] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k(EN) value. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28(1): 33—37

[17] Zantua M I, Bremner J M. Comparison of methods of assaying urease activity in soils. *Soil Biol Biochem*, 1975, 7(4/5): 291—295

[18] Geisseler D, Horwath W R. Regulation extracellular protease activity in soil in response to different sources and concentrations of nitrogen and carbon. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(12): 3040—3048

[19] Schmidt S K, Lipson D A, Ley R E, et al. Impacts of chronic nitrogen additions vary seasonally and by microbial functional group in tundra soils. *Biogeochemistry*, 2004, 69(1): 1—17

[20] Zhang Q H, Zak J C. Effects of water and nitrogen amendment on soil microbial biomass and fine root production in a semi-arid environment in West Texas. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(1): 39—45

[21] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34(9): 1309—1315

[22] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010. Dou S. *Soil or-*

- ganic matter (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [23] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G, et al. Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam. *Environ Microbiol*, 2008, 10(6): 1601—1611
- [24] Geisseler D, Horwath W R, Scow K M. Soil moisture and plant residue addition interact in their effect on extracellular enzyme activity. *Pedobiologia*, 2011, 54(2): 71—78
- [25] Xiao C W, Janssens I A, Liu P, et al. Irrigation and enhanced soil carbon input effects on below-ground carbon cycling in semi-arid temperate grasslands. *New Phytologist*, 2007, 174(4): 835—846

DYNAMICS OF NITROGEN IN TOPSOIL RELATED TO INTEGRATED WATER AND NITROGEN MANAGEMENT

Chen Lin^{1,2} Zhang Jiabao^{1†} Zhao Bingzi¹ Huang Ping³

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122*)

Abstract From the fields of a long-term (since 2005) experiment on integrated water and nitrogen management in Fengqiu National Agro-ecological Experiment Station, samples were taken of the soils in the cultivated layers (0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm and 0 ~ 20 cm) of fields under different patterns of integrated water and nitrogen management after the harvest of summer maize in September, 2011 for analysis of six forms of nitrogen, i. e. inorganic nitrogen (IN), organic nitrogen (ON), dissolved organic nitrogen (DON), acidolytic organic nitrogen (AON), acidolytic ammonium nitrogen (AAN), microbial biomass nitrogen (MBN), and three biological indices that are closely related to N turnover, i. e. urease activity (URE), Protease activity (PRO) and nitrification potential (NP). Three-way ANOVA of the analytic results indicate that both nitrogen fertilization and topsoil depth had significant effects on the six forms of nitrogen, but irrigation had none. One-way ANOVA shows that nitrogen fertilization significantly increased soil IN, ON, URE and NP in the 0 ~ 20 cm topsoil, but had no such effect on soil AON and AAN and volume of irrigation had nothing to do with the six forms of nitrogen, PRO and NP. Regardless of patterns of integrated water and nitrogen management, the six forms of nitrogen, URE, PRO and NP were almost all considerably higher in the 0 ~ 10 cm topsoil than in the 10 ~ 20 cm topsoil. Through the experiment, it is found that irrigation to meet the field water-holding capacity in the 0 ~ 20 cm soil layer and nitrogen fertilization at a rate of 190 kg N hm⁻² per crop season is the optimal patterns of integrated water and nitrogen management.

Key words Integrated water and nitrogen management; Topsoil; Dynamics of nitrogen

(责任编辑:檀满枝)