

氮肥运筹对黄壤坡耕地作物产量和土壤无机氮累积量的影响

张邦喜^{1, 2, 3}, 范成五¹, 李国学³, 王文华¹, 周瑞荣¹, 胡岗¹, 秦松^{1, 2*}

[1. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 农业农村部(贵州)耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵州 贵阳 550006; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193]

摘要: 通过3年田间试验, 探索贵州黄壤坡耕地玉米-小麦间套作体系作物增产、环境友好的适宜氮肥施用量。本研究设置6个小麦氮肥用量(N0、90、120、150、180和240 kg/hm²)和6个玉米氮肥用量(N0、146、195、244、293和390 kg/hm²), 分别用N0、N1、N2、N3、N4、N5表示。结果表明: 玉米在0~146.25 kg/hm²的施氮量下, 籽粒产量随着施氮量提高而增加, 超过146.25 kg/hm²施氮量, 籽粒产量呈下降的趋势; 玉米在0~243.25 kg/hm²的施氮量下, 植株氮素累积量随着施氮量提高而增加, 超过243.25 kg/hm²的施氮量, 植株氮素累积量呈下降的趋势。小麦在0~150 kg/hm²的施氮量下, 籽粒产量和植株氮素累积量随着施氮量提高而增加, 超过150 kg/hm²施氮量, 籽粒产量和植株氮素累积量呈下降的趋势。玉米-小麦间套作在0~236.25 kg/hm²的施氮量下, 籽粒产量随着施氮量提高而增加, 超过236.25 kg/hm²施氮量, 籽粒产量呈下降的趋势; 玉米-小麦间套作在0~315 kg/hm²的施氮量下, 植株氮素累积量随着施氮量提高而增加, 超过315 kg/hm²施氮量, 植株氮素累积量呈下降的趋势。3年试验周期内氮素利用率较低, 不超过25%; 土壤中残留无机氮随着施肥量的增加而增加, 并以NO₃⁻-N为主, 100 cm土体累积的NO₃⁻-N与周年施氮量呈正相关(R²=0.746 3)。N0、N1、N2、N3、N4、N5处理的0~100 cm土体累积无机氮分别为275.5、301.5、292.1、366.5、431.2、616.9 kg/hm², N0、N1、N2、N3、N4、N5处理的耕层土壤无机氮占100 cm土体内土壤无机氮的比例分别为18.1%、19.0%、27.3%、26.2%、33.9%、22.1%。耕层无机氮表聚效应较弱, 而土体累积无机氮含量较高。当每年施氮量为225.6~264.6 kg/hm²时, 籽粒产量为3 784.8~3 888.2 kg/hm², NO₃⁻-N累积量在217.5~228.9 kg/hm², 增施氮肥, 有利于籽粒增产, 土壤NO₃⁻-N累积量平均增速为0.29 kg/kg, 是贵州黄壤坡耕地麦-玉间套作体系氮肥适宜施用量, 更有利于黄壤区农业的可持续发展。

关键词: 氮肥运筹; 黄壤坡地; 产量; 无机氮; 麦-玉轮作

我国是农业大国, 对耕地依赖性强, 土地复种指数高, 耕作方式粗放。第二次土壤普查数据显示, 我国耕地面积为13 251.95万hm², 其中坡耕地占35.09%, 主要分布在经济落后的丘陵山区, 因水土流失严重易干旱缺水, 土壤贫瘠肥力低, 耕层浅薄, 保土保水保肥能力差, 导致大部分坡耕地为低产田, 一般单产仅1 500 kg/hm², 有的600~750 kg/hm², 甚至更低。坡耕地面积较大, 分布较广, 种类较多, 如南方红壤坡耕地、西南地区黄壤和紫色土坡耕地、黄土高原坡耕地、黑土坡耕地等, 对

我国山区农业的贡献极为重要, 破除坡耕地障碍因子成为了首要问题。为此, 许多研究者针对不同区域的坡耕地进行了氮肥运筹及施肥方式的研究。丹江口库区红壤坡耕地的玉米-小麦轮作的氮肥运筹为玉米50%基肥+20%苗肥+30%穗肥, 小麦80%基肥+20%拔节肥^[1], 比“一炮轰”的施肥方式增加产量, 提高效益; 在山东棕壤坡耕地上, 玉米-小麦轮作中施用缓控释肥, 不仅可减少施肥次数, 还能增加产量(7.3%~13.3%), 提高品质^[2]; 在西南地区碱性紫色土坡耕地上, 玉米-小麦轮作中有机肥部分替代化肥, 不仅能增加产量, 还可改善土壤质地, 减少水土流失^[3-4], 在西南地区酸性紫色土坡耕地上, 减少玉米-小麦轮作39%的氮肥, 产量无显著降低^[5], 但显著减少N₂O排放^[6]; 在东北地区的黑土坡耕地上, 减少氮肥用量+生物篱+横坡耕作, 玉米不减产且显著降低氮素淋失^[7]。

收稿日期: 2018-04-10; 录用日期: 2018-07-22

基金项目: 黔农科院院专项[2014]014号; 贵州省科技计划黔科平台[2013]4002号。

作者简介: 张邦喜(1984-), 男, 贵州盘州市人, 助理研究员, 在读博士, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: zbx@cau.edu.cn。

通讯作者: 秦松, E-mail: qinsong@163.com。

贵州黄壤坡耕地大多酸、粘、有效养分贫瘠, 2002 ~ 2016 年统计数据显示贵州省玉米单产为 4.7 t/hm²; 其中 2002 ~ 2007 年, 贵州省玉米单产为 5.0 t/hm²^[8]; 2008 ~ 2016 年, 贵州省玉米单产为 4.4 t/hm² (贵州省统计年鉴), 是典型的低产田、低利润区^[9]。山区农业地块破碎加之近年来经济水平的提高, 同时农民劳动力匮乏^[10]、老龄化严重、科学种田意识薄弱^[11], 农户调研显示施肥过量与不足并存^[12], 过量施肥的田块达到 33%^[13], 为了追求高产盲目大量施用氮肥, 导致环境问题突出^[6, 14-15]。因此, 确定合理施氮量是获得高产稳产、维持土壤氮肥力和降低施氮引起环境污染的关键。玉米、小麦是贵州黄壤坡耕地上主要的粮食作物, 但对于玉米-小麦间套作的氮肥运筹方面的研究较少, 大部分研究仅为玉米的氮肥运筹研究^[16]或耕作方式的改变对黄壤坡耕地水土流失的影响^[17], 或者是短期的氮肥运筹试验^[18], 缺乏长期玉米-小麦间套作研究的数据, 为此, 笔者以贵州黄壤坡耕地肥料效应为研究基础, 通过 3 年的田间试验, 综合考虑产量、氮肥利用率和环境效应, 研究了不同施氮量对黄壤坡耕地麦-玉轮作体系作物产量、氮肥利用率、土壤无机氮含量的影响, 为黄壤区坡耕地麦-玉轮作体系作物增产稳产、环境友好的氮肥施用量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验设置在贵州中部, 位于贵阳市花溪区湖潮乡 (106° 31' E, 26° 26' N)。该区属中亚热带东部湿润季风气候区, 水热资源丰富, 年均温度 14.9 °C, 无霜期 285 d, 年降水量 1 187 mm, 主要集中于 4 ~ 10 月。供试土壤系贵州典型黄壤, 为第四纪红色粘土母质发育的黄粘泥土。耕层土壤的基本理化性状为: 有机质 18.21 g/kg, 全氮 1.44 g/kg, 全磷 0.68 g/kg, 全钾 24.66 g/kg, 有效磷 13.33 mg/kg, 速效钾 82.30 mg/kg, 0 ~ 100 cm 土层的硝态氮 (NO₃⁻-N) 126.8 kg/hm², pH 值 6.1, 土壤容重 1.29 g/cm³。

1.2 试验设计

试验于 2011 年 4 月开始, 2014 年 6 月结束, 地形为丘陵山腰旱坡地, 坡向西南, 坡度 10°, 设 6 个处理, 小区面积为 31.5 m² (9 m × 3.5 m), 3 次重复, 随机区组排列。小麦、玉米施氮水平见表 1, 其中玉米、小麦 N 优化处理是以玉米、小麦需

肥特征结合土壤养分, 在当地农民习惯施肥的基础上设计。玉米施肥方式为穴施, 所有处理的磷、钾施用量均为 P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²; 小麦施肥方式为条施, 所有处理的磷、钾施用量均为 P₂O₅ 75 kg/hm², K₂O 90 kg/hm²。氮肥为尿素, 玉米季按基: 蘖: 穗肥比例 20: 30: 50 施用, 小麦季按基: 蘖: 穗肥比例 40: 20: 40 施用; 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 12%), 钾肥为硫酸钾 (K₂O 50%), 均作基肥一次施入。其它田间管理均按照当地农技部门的推荐技术。供试玉米品种为黔单 21, 小麦品种为黔麦 18。玉米于每年 4 月底或 5 月初种植, 于苗期和大喇叭口期追肥, 9 月底或 10 月上旬收获。小麦于每年 10 月种植, 于分蘖期和抽穗期追肥, 次年 5 月底或 6 月初收获。小麦和玉米在 5 月份有一个月的套种期。

表 1 试验氮肥处理 (kg/hm²)

处理	玉米	小麦
NO (CK)	0 (不施氮肥)	0 (不施氮肥)
N1	146.25 (75% N 优化)	90 (75% N 优化)
N2	195 (N 优化)	120 (N 优化)
N3	243.75 (125% N 优化)	150 (125% N 优化)
N4	292.5 (150% N 优化)	180 (150% N 优化)
N5	390 (200% N 优化)	240 (200% N 优化)

1.3 测定项目与方法

作物收获后分别采集、制备籽粒和秸秆样品; 每个小区随机采集 5 株玉米、20 株小麦考种, 实收籽粒, 秸秆风干测产作为实际产量。土壤样品于小麦收获后玉米种植前采集。采用凯氏定氮法测定植株、籽粒全氮含量; 土壤铵态氮用氯化钾浸提 (液: 土 = 5: 1) - 靛酚蓝比色法; 土壤硝态氮用氯化钾浸提 (液: 土 = 5: 1) - 紫外分光光度法^[19]。

1.4 数据计算与分析

植株氮积累量 (PNA, kg/hm²) = 籽粒氮素积累量 + 秸秆氮素积累量

氮肥吸收利用率 (NARE, %) = (施氮区植株氮素积累量 - 空白区植株氮素积累量) / 施氮量 × 100

土壤硝态氮、铵态氮积累量按以下公式计算^[20]:

$$M = \sum (C_i \times B_i \times D_i) \times 0.1$$

式中, M 为单位面积硝态氮、铵态氮积累量 (t/hm²); C_i 为第 i 层硝态氮、铵态氮的含量 (g/kg); B_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm³); D_i 为第 i 层土

壤厚度 (cm)。

试验数据处理采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行统计分析, 结果采用 Duncan 法在 $P < 0.05$ 水平上进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 玉米 - 小麦间套作体系产量

从表 2 可知, 玉米 3 年平均产量表现为 $N1 > N2 > N4 > N3 > N0 > N5$, 即不施氮肥时, 玉米籽粒产量为 2.429 t/hm^2 , 产量随施氮量的增加而增加, 当施氮量达 $N 146.25 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N1 处理), 玉米籽粒产量最高, 为 3.722 t/hm^2 , 之后产量随施氮量增加而降低, 当施氮量达 $N 390 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N5 处理), 玉米籽粒产量最低, 为 2.277 t/hm^2 , N1 比 N0 提高 53.2%, N1 与 N2、N3、N4 差异不显著, 与 N0、N5 差异显著; 小麦 3 年平均产量表现为 $N3 > N2 > N1 > N4 > N0 > N5$, 即不施氮肥时, 小麦籽粒产量为 0.948 t/hm^2 , 产量随施氮量的增加而增加, 施氮量达 $N 150 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N3 处理), 小麦籽粒产量最高, 为 1.219 t/hm^2 , 之后产量随施氮量增加而

降低, 当施氮量达 $N 240 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N5 处理), 小麦籽粒产量最低, 为 0.745 t/hm^2 , N3 比 N0 提高 28.6%, N3 与 N1、N2、N4 差异不显著, 与 N5 差异显著; 玉米 - 小麦间套作 3 年平均产量表现为 $N1 > N2 > N3 > N4 > N0 > N5$, 即不施氮肥时, 玉米 - 小麦间套作籽粒产量为 3.377 t/hm^2 , 产量随施氮量的增加而增加, 玉米 - 小麦间套作施氮量达 $N 236.25 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N1 处理), 籽粒产量最高, 为 4.842 t/hm^2 , 之后产量随施氮量增加而降低, 当施氮量达 $N 630 \text{ kg/hm}^2$ 时 (N5 处理), 玉米 - 小麦间套作籽粒产量最低, 为 3.022 t/hm^2 , N1 比 N0 提高 43.4%, N1 与 N2、N3、N4 差异不显著, 与 N0、N5 差异显著。由此可见, 不同施氮水平的玉米产量先随施氮量的增加而增加, 增加到一定水平后, 随着施肥量的增加而下降, 但小麦在施肥量较多的情况下, 其产量有明显下降趋势。周年产量随施肥量的变化趋势与玉米的类似 (表 2)。表明玉米 - 小麦间套作的籽粒产量与施肥量呈二次抛物线趋势, 在一定范围内, 产量随施氮量增加而提高, 但氮肥施用超过一定水平后, 增产的速度下降, 最后出现负增长。

表 2 三年不同处理的作物产量及增产率

处理	玉米		小麦		周年	
	籽粒产量 (t/hm^2)	增产率 (%)	籽粒产量 (t/hm^2)	增产率 (%)	籽粒产量 (t/hm^2)	增产率 (%)
第一年						
N0 (CK)	$3.174 \pm 0.150c$		$0.875 \pm 0.138c$		$4.048 \pm 0.275d$	
N1	$4.049 \pm 0.125a$	27.6	$1.263 \pm 0.241ab$	44.4	$5.311 \pm 0.366ab$	31.2
N2	$4.042 \pm 0.154a$	27.4	$0.970 \pm 0.139bc$	10.9	$5.012 \pm 0.265abc$	23.8
N3	$4.022 \pm 0.158a$	26.7	$1.439 \pm 0.101a$	64.6	$5.462 \pm 0.199a$	34.9
N4	$3.551 \pm 0.162b$	11.9	$1.099 \pm 0.247bc$	25.6	$4.650 \pm 0.397c$	14.9
N5	$3.565 \pm 0.208b$	12.3	$1.282 \pm 0.101ab$	46.6	$4.847 \pm 0.137bc$	19.7
第二年						
N0 (CK)	$2.741 \pm 0.135c$		$1.202 \pm 0.040ab$		$3.943 \pm 0.110c$	
N1	$3.836 \pm 0.165a$	39.9	$1.262 \pm 0.179ab$	5.0	$5.098 \pm 0.289a$	29.3
N2	$3.835 \pm 0.185a$	39.9	$1.310 \pm 0.152a$	9.0	$5.145 \pm 0.284a$	30.5
N3	$3.291 \pm 0.129b$	20.1	$1.233 \pm 0.350ab$	2.6	$4.524 \pm 0.387b$	14.7
N4	$3.494 \pm 0.079b$	27.5	$0.923 \pm 0.034b$	-23.2	$4.417 \pm 0.094b$	12.0
N5	$2.591 \pm 0.139c$	-5.5	$0.442 \pm 0.096c$	-63.2	$3.033 \pm 0.234d$	-23.1
第三年						
N0 (CK)	$1.372 \pm 0.642bc$		$0.767 \pm 0.256ab$		$2.139 \pm 0.870ab$	
N1	$3.282 \pm 1.136a$	139.2	$0.835 \pm 0.007ab$	8.9	$4.117 \pm 1.131a$	92.5
N2	$2.922 \pm 0.914ab$	113.0	$1.119 \pm 0.240a$	46.0	$4.041 \pm 1.150a$	88.9
N3	$2.924 \pm 0.602ab$	113.1	$0.984 \pm 0.334ab$	28.3	$3.908 \pm 0.936a$	82.7
N4	$3.313 \pm 1.679a$	141.5	$0.967 \pm 0.406ab$	26.0	$4.280 \pm 2.081a$	100.1
N5	$0.677 \pm 0.006c$	-50.7	$0.510 \pm 0.236b$	-33.5	$1.186 \pm 0.238b$	-44.5
三年均值						
N0 (CK)	$2.429 \pm 0.881b$		$0.948 \pm 0.245ab$		$3.377 \pm 1.040b$	
N1	$3.722 \pm 0.671a$	53.2	$1.120 \pm 0.261a$	18.2	$4.842 \pm 0.823a$	43.4
N2	$3.599 \pm 0.700a$	48.2	$1.133 \pm 0.216a$	19.6	$4.732 \pm 0.789a$	40.2
N3	$3.412 \pm 0.579a$	40.5	$1.219 \pm 0.316a$	28.6	$4.631 \pm 0.852a$	37.2
N4	$3.453 \pm 0.851a$	42.2	$0.996 \pm 0.251ab$	5.1	$4.449 \pm 1.073a$	31.8
N5	$2.277 \pm 1.279b$	-6.2	$0.745 \pm 0.427b$	-21.4	$3.022 \pm 1.595b$	-10.5

注: 同列不同小写字母表示达到 5% 上的差异显著水平, 下同。

小麦产量变异较大, 导致增产率极不稳定, 重复性较差。从年际产量变化而言(表2), 随着种植年限增加, 产量逐年降低, 不考虑方差齐性, 则第一年与第三年的产量有显著差异。而小麦在方差齐性的前提下, 第一年明显高于第三年的产量。

2.2 麦-玉轮作体系氮素吸收

施用氮肥能促进玉米、小麦对氮素的吸收。由表3可见, 不施氮肥时, 玉米籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为25.0、24.1 kg/hm², 施用氮肥后, 吸氮量逐渐增加, 在施氮243.75 kg/hm²时(N2处理), 玉米籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为49.8、37.7 kg/hm², 且达到最高值, 之后随施氮量增加, 吸氮量下降, 在施氮390 kg/hm²时(N5处理), 玉米籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为32.0、25.0 kg/hm², 且达到施肥处理的最低值; 不施氮肥时, 小麦籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为26.3、17.9 kg/hm², 施用氮肥后, 吸氮量逐渐增加, 在施氮150 kg/hm²时(N3处理), 小麦籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为37.4、37.7 kg/hm², 且达到最高值, 之后随施氮量增加, 吸氮量下降, 在施氮240 kg/hm²时(N5处理), 小麦籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为23.4、20.9 kg/hm², 且达到施肥处理的最低值。不施氮肥时, 玉米-小麦间套作籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为51.4、42.0 kg/hm², 施用氮肥后, 吸氮量逐渐增加, 在施氮393.75 kg/hm²时(N3处理), 玉米-小麦间套作籽粒吸氮量为85.6 kg/hm², 且达到

最高值, 在施氮315 kg/hm²时(N2处理), 玉米-小麦间套作秸秆吸氮量为71.1 kg/hm², 且达到最高值, 之后随施氮量增加, 吸氮量下降, 在施氮630 kg/hm²时(N5处理), 玉米-小麦间套作籽粒吸氮量和秸秆吸氮量分别为55.4、45.9 kg/hm², 且达到施肥处理的最低值。因此, 随着施氮量的增加, 玉米、小麦籽粒及秸秆吸氮量呈先增加后减少的抛物线变化趋势。施氮处理小麦籽粒吸氮量和玉米籽粒吸氮量显著高于N0, 除去N5处理; 各处理间秸秆吸氮量没有明显差异。施氮小麦N3处理籽粒和秸秆吸氮量较高。施氮处理的玉米-小麦间套作籽粒和秸秆吸氮量(除去N5处理)均显著高于N0处理。说明, 适量增施氮肥能显著增加玉米、小麦籽粒及秸秆吸氮量, 施氮过多不利于玉米、小麦籽粒及秸秆氮素含量的增加。

从氮肥利用率来看, 玉米氮肥利用率表现为N1>N2>N3>N4>N5, 玉米最高产量为3.722 t/hm²(N1)时, 施氮量为N 146.25 kg/hm², 25.4%的化肥氮能够被玉米吸收利用, 显著高于N3、N4、N5处理; 小麦氮肥利用率表现为N3>N2>N1>N4>N5, 小麦最高产量为1.219 t/hm²(N3)时, 小麦施氮为N 150 kg/hm², 20.6%的化肥氮能够被小麦吸收利用, 显著高于N5处理; 玉米-小麦间套作最高产量为4.842 t/hm²(N1处理)时, 施氮量为N 236.25 kg/hm², 23.2%的化肥氮能够被麦-玉吸收利用, 显著高于N4、N5处理。

表3 三年不同处理的作物氮素积累量均值

氮水平	玉米			小麦			周年		
	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	秸秆吸氮量 (kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	秸秆吸氮量 (kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	秸秆吸氮量 (kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)
N0 (CK)	25.0 ± 10.3b	24.1 ± 10.5a		26.3 ± 14.2ab	17.9 ± 11.2d		51.4 ± 22.1b	42.0 ± 9.0b	
N1	49.5 ± 9.5a	36.8 ± 20.5a	25.4	34.7 ± 10.3ab	27.2 ± 7.5cb	19.6	84.2 ± 14.7a	63.9 ± 18.6a	23.2
N2	49.8 ± 9.3a	37.7 ± 15.6a	19.6	35.2 ± 11.6ab	33.4 ± 9.1cb	20.3	85.0 ± 14.4a	71.1 ± 19.0a	19.9
N3	48.1 ± 10.0a	30.1 ± 14.3a	11.9	37.4 ± 10.1a	37.7 ± 7.4a	20.6	85.6 ± 16.2a	67.8 ± 16.6a	15.2
N4	47.4 ± 12.7a	34.1 ± 15.5a	11.1	30.1 ± 8.0ab	30.5 ± 8.8cb	9.1	77.6 ± 16.6a	64.6 ± 22.1a	10.3
N5	32.0 ± 13.7b	25.0 ± 10.4a	2.0	23.4 ± 12.3b	20.9 ± 6.7cd	0.0	55.4 ± 25.0b	45.9 ± 15.0b	1.3

2.3 玉米-小麦间套作体系土壤中的无机氮含量

作物收获后, 耕层(0~20 cm)土壤中硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)的分配比例见表4, 玉米季占比为9.3%~12.4%, 小麦季占比为4.5%~7.0%, 各处理耕层土壤中NH₄⁺-N浓度偏低。不施氮肥时, 玉米季收获后NO₃⁻-N和NH₄⁺-N分别为32.4、3.1 kg/hm², 施用氮肥后, NO₃⁻-N和

NH₄⁺-N浓度逐渐增加, 在施氮390 kg/hm²时(N5处理), NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度分别为69.1、8.6 kg/hm², 且达到最高值; 不施氮肥时, 小麦季收获后NO₃⁻-N和NH₄⁺-N分别为47.3、2.6 kg/hm², 施用氮肥后, NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度逐渐增加, 在施氮180 kg/hm²时(N4处理), NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度分别为138.4、7.9 kg/hm², 且达到最高值, 在施氮240

kg/hm²时 (N5 处理), NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度分别为 128.7、7.7 kg/hm², 与 N4 处理无显著差异。因此, NO₃⁻-N 或 NH₄⁺-N 的含量均有随施氮量的增加而增加的趋势。说明氮肥施用量越多, 土壤耕层中残留的无机氮越多, 从而增加氮素的流失风险。不施氮

肥时, 0 ~ 1 m 土壤中残留的无机氮为 275.5 kg/hm², 施用氮肥后, 土壤残留无机氮逐渐增多, 当施氮达 630 kg/hm²时, 土壤残留无机氮为 616.9 kg/hm², 且达到最高值。由此可见, 0 ~ 1 m 土壤中残留无机氮随施氮量的增多呈逐渐积累增加的趋势。

表 4 三年不同处理的土壤无机氮含量均值

氮水平	玉米季 (0 ~ 20 cm)			小麦季 (0 ~ 20 cm)			周年 (0 ~ 1 m)	周年耕层无机氮占 1 m 土体内无机氮的比例 (%)
	硝态氮 (N kg/hm ²)	铵态氮 (N kg/hm ²)	铵态氮 / 硝态氮 (%)	硝态氮 (N kg/hm ²)	铵态氮 (N kg/hm ²)	铵态氮 / 硝态氮 (%)	无机氮 (N kg/hm ²)	
N0 (CK)	32.4 ± 34.4a	3.1 ± 2.4b	9.6	47.3 ± 40.4c	2.6 ± 2.1a	7.0	275.5 ± 79.8d	18.1
N1	55.8 ± 40.0a	4.7 ± 2.5ab	8.4	54.4 ± 38.3bc	3.0 ± 1.8a	5.5	301.5 ± 91.5cd	19.0
N2	54.7 ± 31.4a	5.1 ± 3.3ab	9.3	76.3 ± 47.9bc	3.4 ± 1.9a	4.5	292.1 ± 82.1cd	27.3
N3	54.8 ± 27.9a	5.6 ± 3.6ab	10.2	91.1 ± 20.9b	4.9 ± 3.8a	5.4	366.5 ± 41.9bc	26.2
N4	60.8 ± 39.7a	6.1 ± 3.6ab	10.0	138.4 ± 41.9a	7.9 ± 7.4a	5.7	431.2 ± 76.9b	33.9
N5	69.1 ± 37.6a	8.6 ± 6.6a	12.4	128.7 ± 33.2a	7.7 ± 8.2a	6.0	616.9 ± 109.6a	22.1

2.4 玉米-小麦间套作体系产量及环境的综合分析

由图 1 可知, 玉米产量与施氮量的关系可用二次曲线方程拟合。通过计算, 当玉米籽粒产量最高 (3 655.0 kg/hm²) 时的施氮量为 193.8 kg/hm², 介于处理 N1、N2 之间。当以最高产量 95% 为相对产量计算得到, 相对产量为 3 472.3 kg/hm², 对应的施氮量为 269.4 kg/hm² (舍去) 和 118.3 kg/hm², 118.3 kg/hm²

为环境友好型的推荐施肥量。同理, 计算得出施氮量为 101.7 kg/hm² 时, 小麦籽粒产量最高 (1 193.6 kg/hm²), 施氮量介于 N1、N2 之间。当相对产量为 1 133.9 kg/hm² 时, 施氮量为 151.9 kg/hm² (舍去) 和 51.5 kg/hm², 51.5 kg/hm² 为环境友好的推荐施肥量。计算得出周年施氮量为 352.8 kg/hm² 时, 周年麦-玉米系统籽粒产量最高 (3 983.9 kg/hm²), 施氮量介于

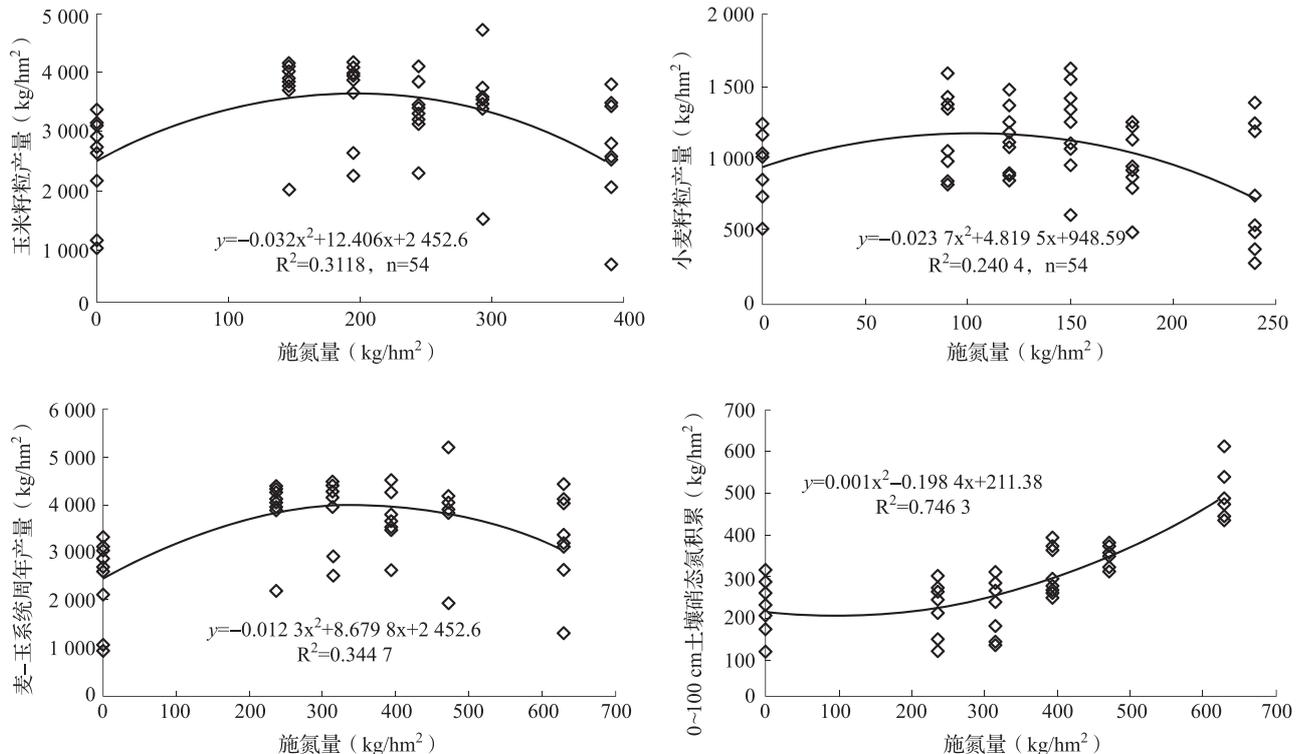


图 1 施氮量与产量及环境指标的拟合曲线

N2、N3 之间。当相对产量为 3 784.7 kg/hm² 时, 施氮量为 480.1 kg/hm² (舍去) 和 225.6 kg/hm², 225.6 kg/hm² 为环境友好的推荐施肥量。

本研究以氮肥效应为基础, 实现高产的同时减少对环境的影响, 通过 3 年的定位试验, 将 0 ~ 100 cm 土壤中残留的 NO₃⁻-N 累积量 (环境指标) 作为确定氮肥投入阈值的限定条件。(1) 按 0 到最高产量的 95% 时对应的施氮量 (环境友好的推荐施氮量), (2) 环境友好的推荐施氮量达到最高产量时氮肥投入量的 75%, (3) 最高产量氮肥投入量的 75% 至最高产量的氮肥投入量, (4) 大于最高产量的氮肥投入量, 可以得出本试验氮肥投入阈值的 4 种情况: (1) 当施氮量为 0 ~ 225.6 kg/hm² 时, 籽粒产量为 2 452.6 ~ 3 784.7 kg/hm², NO₃⁻-N 积累量在 211.4 ~ 217.5 kg/hm², 麦-玉因施氮量较少将减产, 土壤 NO₃⁻-N 积累量平均增速为 0.03 kg/kg; (2) 当施氮量为 225.6 ~ 264.6 kg/hm² 时, 籽粒产量为 3 784.8 ~ 3 888.2 kg/hm², NO₃⁻-N 积累量为 217.5 ~ 228.9 kg/hm², 增施氮肥, 有利于周年籽粒增产, 土壤 NO₃⁻-N 积累量平均增速为 0.29 kg/kg; (3) 当施氮量为 264.6 ~ 352.8 kg/hm² 时, 周年籽粒产量为 3 888.2 ~ 3 983.9 kg/hm², NO₃⁻-N 积累量在 228.9 ~ 265.9 kg/hm², 增施氮肥, 有利于籽粒增产, 土壤 NO₃⁻-N 积累量平均增速为 0.42 kg/kg; (4) 当施氮量大于 352.8 kg/hm² 时, 籽粒产量小于 3 983.9 kg/hm², NO₃⁻-N 积累量大于 265.9 kg/hm², 增施氮肥, 不利于籽粒增产, 土壤 NO₃⁻-N 积累量增速大于 0.51 kg/kg。

3 讨论

3.1 不同施氮水平对麦-玉轮作体系产量、氮素吸收的影响

施用氮肥能增加作物产量, 而过量施用氮肥则可因为供给养分不平衡^[21]、作物贪青徒长^[6]、土壤酸化^[15]等原因导致减产。经 3 年的试验研究可知, 除 N5 处理外, 周年施肥处理较不施肥处理产量有明显提升, 这可能是因为 N5 处理施用氮肥量过多致土壤明显酸化 (2014 年小麦季收获测土, N5 处理的 pH 值明显小于其他处理) 从而造成减产^[22]。N1 处理周年增产率最高, 但与 N2、N3、N4 处理增产差异不显著。

近年来许多研究者对西南地区黄壤的地力贡

献率做了研究^[23-24], 刘彦伶等^[25] 利用 23 年长期定位试验表明贵州省黄壤坡耕地对玉米产量的平均地力贡献率为 51.8%, 本试验中 N0 处理 3 年平均玉米产量为 2.429 t/hm², 由此可推算, 该试验施肥后的理论产量为 4.392 t/hm², 而试验中施肥处理 (N5 处理除外) 的实际产量仅为统计产量的 79% ~ 85%; 小麦施肥处理 (N5 处理除外) 增产率仅为 9.7% ~ 31.7%, 与 N0 处理产量无显著差异。这极有可能是近年来日照时数减少导致的减产^[26-27]。刘丽等^[27] 通过 1962 年至 1999 年的贵州省日照数据, 得出贵阳市冬半年 (10 月至 3 月) 总日照时数为 426 h, 而该试验的 3 年平均冬半年日照时数为 167 h, 并且吴丽华等^[28]、姚晓兰等^[29] 的研究均指出在贵州不同地区的过去 50 年中日照时数随年代减少 (年日照时数每 10 年减少速率为 57.28 ~ 26.66), 这与近年来云量的增加有关。

3.2 不同施氮水平对麦-玉轮作体系耕层矿质氮含量的影响

氮肥施用后, 除去被植物吸收, 还有一部分残留在土壤中^[14], 施入过多氮素, 会导致较多的氮素流失到环境中^[18, 30]。各处理耕层土壤中 NH₄⁺-N 浓度偏低, 整体而言旱地土壤残留的氮以硝态氮为主^[31], 这是因为旱地土壤硝化作用强烈, 矿化产生的 NH₄⁺-N 很快被转化为 NO₃⁻-N。从耕层土壤 NH₄⁺-N 含量变化来看, 小麦收获后各处理间耕层土壤中无显著差异, 说明不同施氮水平对黄壤冬小麦耕层土壤 NH₄⁺-N 残留无明显影响, 反之, 玉米收获后, 各处理间耕层的 NH₄⁺-N 含量有显著差异, N5 处理显著高于 N0 处理; 对于耕层土壤的 NO₃⁻-N 而言, 玉米收获后的耕层含量差异不显著, 而小麦收获后的耕层含量差异显著, N5、N4 > N3、N2、N1。这是因为小麦种植季为干旱季, 3 年平均降水量为 330 mm, 降水较少; 而玉米种植季为湿润季, 3 年平均降水量为 640 mm, 降水较多。湿润季中, 表层 NH₄⁺-N 对无机总氮的贡献率较多 (玉米季: NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 的百分比为 8.4% ~ 12.4%, 小麦季: NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 的百分比为 4.5% ~ 7.0%), 起一定作用。

0 ~ 100 cm 土壤中残留的无机氮随施氮量的增多而增加。在现有的肥力条件下土壤作物体系对施入的氮肥环境承受力已经很低。因此, 在前茬施氮量较高的条件下, 应适当减少后茬施氮量, 这样

才能合理利用氮肥且不引起环境问题。基于本研究的二次抛物线方程 ($y=0.001x^2-0.1984x+211.38$, $R^2=0.7463$), 当施氮量超过 $N 99.2 \text{ kg/hm}^2$, 残留的硝态氮就开始增加, 增加的速率为正的线性递增。旱地收获后耕层土壤无机氮具有表聚效应^[32-34], 但本研究的耕层 (0 ~ 20 cm) 无机氮在 100 cm 土体内所占比例较低 (表 4), 最高的比例为 33.9%, 平均为 24.4%, 这可能是当地的黄壤特性造成的, 贵州黄壤具有酸、粘、瘦的特征, 刘海隆等^[35] 在该区域发现土壤 30 cm 以下不见根系, 耕层土壤容重和粘粒含量较低而犁底层和心土层容重和粘粒含量较大^[36], 土壤通透性差 (尤其是犁底层), 犁底层和心土层持水量高而耕层水分少, 不利于土壤水分的上下运行, 作物利用土壤水分的难度大, 氮肥被更多的带到耕层以下同时因缺少上行水的运输难以被作物利用, 这部分养分或被留在土壤内部或随暴雨淋洗出土体到达水体, 值得进一步探究。

3.3 不同施氮水平对麦-玉系统产量及环境的综合影响

贵州黄壤区径流的氮肥损失系数约为 1%^[17], 黄壤室内模拟试验^[37] 表明在 pH 值为 6.1 的条件下, 氮挥发的氮肥损失系数为 0.02%。不难看出, 黄壤区的肥料损失以土体损失为主, 而只有在极端情况下, 短期试验定量无机氮库才会有明显变化^[38], N4、N5 处理的无机氮明显高于其他处理, 表明氮肥严重过量, 并且产量不再增加甚至出现减产, N5 处理已出现明显酸化。考虑到作物增产和降低土壤无机氮累积量的平衡关系, 当施氮量为 $225.6 \sim 264.6 \text{ kg/hm}^2$ 时, 周年籽粒产量为 $3784.8 \sim 3888.2 \text{ kg/hm}^2$, NO_3^- -N 积累量在 $217.5 \sim 228.9 \text{ kg/hm}^2$, 增施氮肥, 有利于周年籽粒增产, 土壤 NO_3^- -N 积累量平均增速为 0.29 kg/kg , 这与前人的研究结果较一致^[18], 玉米季施氮量为 $102.2 \sim 120.0 \text{ kg/hm}^2$, 小麦季施氮量为 $93.0 \sim 113.2 \text{ kg/hm}^2$ 。本研究得出的玉米、小麦氮肥最佳用量低于国内的推荐施肥量, 每季 $150 \sim 250 \text{ kg/hm}^2$ 。笔者认为这主要是因为试验区位于黄壤坡耕地低产田区, 周年产量平均不足 5 t/hm^2 , 作物无法吸收更多的氮。巨晓棠^[38] 认为地上部吸氮量约等于施氮量, 或以小麦、玉米的百千克收获物需氮量 (小麦为 2.8 kg , 玉米为 2.3 kg) 计算施肥量, 从表 3 可以看出, 本试验周年地上部吸氮量不超过 200 kg/hm^2 。因此, 黄壤

坡耕地实现增产的主要途径不是盲目增施氮肥, 而是提高土壤地力^[23] 或因地制宜施用限制性养分肥料^[39]。本试验 100 cm 土体黄壤的无机氮含量较北方旱地高^[33, 40-42], 且无明显表聚效应, 在超过 1 000 mm 的年降水中, 这些氮素的移动行为值得进一步研究。

4 结论

在贵州黄壤坡耕地上, 玉米-小麦间套作在 $0 \sim 236.25 \text{ kg/hm}^2$ 的施氮量下, 籽粒产量随着施氮量而增加, 超过 236.25 kg/hm^2 施氮量, 籽粒产量呈下降的趋势。土壤耕层无机氮累积量随着施肥量的增加而增加; 玉米季收获后耕层硝态氮无显著差异, 而过量施肥处理 (N5) 的耕层铵态氮较不施肥处理显著增加; 小麦季收获后耕层铵态氮无显著差异, 而处理间的耕层硝态氮差异显著; 玉米季铵态氮含量所占比例高于小麦季。玉米-小麦间套作体系周年 100 cm 土体累积的无机氮随着施肥量的增加而增加, 耕层无机氮表聚效应较弱, 而土体累积无机氮含量较高。当施氮量为 $225.6 \sim 264.6 \text{ kg/hm}^2$ 时, 籽粒产量为 $3784.8 \sim 3888.2 \text{ kg/hm}^2$, NO_3^- -N 积累量在 $217.5 \sim 228.9 \text{ kg/hm}^2$, 增施氮肥, 有利于籽粒增产, 土壤 NO_3^- -N 积累量平均增速为 0.29 kg/kg , 这兼顾作物产量和降低氮素对环境淋溶风险。

参考文献:

- [1] 张小勇. 丹江口库区坡耕地玉米-小麦轮作制度下土壤氮、磷养分流失特征与主控因素研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [2] 范振义. 控释肥对坡耕地小麦-玉米生长及径流氮、磷养分流失的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [3] 闫建梅, 何丙辉, 田太强. 不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响 [J]. 中国农业科学, 2014, 47 (20): 4027-4035.
- [4] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 [J]. 环境科学, 2014, 35 (6): 2129-2138.
- [5] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 864-873.
- [6] Su M M, Kuang F H, Lv Y, et al. Nitrous oxide and methane emissions from paddy soils in southwest China [J]. Geoderma Regional, 2017, 8: 1-11.
- [7] 宿敏敏, 王晓军, 高洪生. 耕作措施与氮肥对黑土流失及氮损失的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31 (6): 1-9.
- [8] 王金洪. 贵州省杂交玉米区试现状、存在问题及对策探讨

- [J]. 种子, 2010, 29 (8): 108-110.
- [9] 于丽艳, 穆月英. 我国玉米地区比较优势研究 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45 (28): 236-239.
- [10] Jia X P, Huang J K, Xiang C, et al. Farmer's adoption of improved nitrogen management strategies in maize production in China: an experimental knowledge training [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12 (2): 364-373.
- [11] Zhang W F, Cao G X, Li X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers [J]. *Nature*, 2016, 537: 671-674.
- [12] 宿敏敏, 黄珊瑜, 赵光明, 等. 黑龙江垦区农户水稻管理现状与对策分析 [J]. 北方水稻, 2009, 429 (2): 28-32.
- [13] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (4): 783-795.
- [14] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106 (9): 3041-3046.
- [15] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (19): 1008-1010.
- [16] 李渝, 张雅蓉, 张文安, 等. 贵州黄壤地区不同施肥处理及降雨量对玉米产量的影响 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (1): 230-235.
- [17] 范成五, 罗益, 王文华, 等. 不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (10): 1948-1955.
- [18] 张邦喜, 范成五, 王萍, 等. 施氮对黄壤坡地玉米/麦轮作体系氮素环境承受力的影响 [J]. 西南农业学报, 2015, 28 (6): 2592-2598.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 张邦喜, 范成五, 罗文海, 等. 不同施肥模式下黄壤旱地土壤碳氮储量分布特征 [J]. 西北农业学报, 2018, 27 (5): 750-756.
- [21] Huang S, Zhang W, Yu X, et al. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of Southern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138 (1/2): 44-50.
- [22] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响 [J]. 土壤通报, 2008, 39 (5): 1221-1223.
- [23] 黄兴成, 石孝均, 李渝, 等. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (8): 1476-1485.
- [24] 徐春丽, 谢军, 王珂, 等. 西南地区玉米产量对基础地力和施肥的响应 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (1): 129-138.
- [25] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28 (11): 3581-3588.
- [26] 杜红, 杜峰. 石河子垦区日照时数变化及对农作物的影响 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5 (1): 49-52.
- [27] 刘丽, 吴俊铭, 徐永灵. 贵州小麦生长与光能资源的关系研究 [J]. 贵州气象, 2003, 27 (5): 8-12.
- [28] 吴丽华, 杨文雄, 邓岑. 贵州玉平县 53a 日照时数变化特征分析 [J]. 贵州气象, 2015, 39 (3): 39-42.
- [29] 姚晓兰, 吴就勇, 杨胜海. 贵州三穗近 54 年日照时数气候变化特征分析 [J]. 新农村, 2012, (11): 1-2.
- [30] 杨绍聪, 吕艳玲, 沐婵, 等. 抚仙湖北部农田区不同施肥对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (15): 1-6.
- [31] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (6): 41-45.
- [32] 杨婷婷, 王庆惠, 陈波浪, 等. 不同施氮水平对库尔勒香梨园土壤无机氮分布的影响 [J]. 经济林研究, 2017, 35 (4): 80-89.
- [33] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (6): 1358-1365.
- [34] 孟建, 李雁鸣, 党红凯. 施氮量对冬小麦氮素吸收利用、土壤中硝态氮积累和籽粒产量的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2007, 30 (2): 1-5.
- [35] 刘海隆, 蒋大明, 刘洪斌, 等. 不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响 [J]. 土壤学报, 2005, 42 (3): 428-433.
- [36] 蒋大明, 魏朝富, 谢德体, 等. 贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 25-29.
- [37] 吴艳香. 土壤氨挥发方法优选及不同 pH 值的影响 [J]. 贵州科学, 2017, 35 (5): 85-90.
- [38] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理指标 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (2): 281-296.
- [39] 陈正刚, 朱青, 王文华, 等. 贵州高海拔地区氮磷钾平衡施肥对小麦产量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2006, 34 (4): 39-41.
- [40] 孙世友, 刘孟朝, 张国印, 等. 不同氮肥措施对小麦-玉米轮作农田无机氮分布和累积的影响 [J]. 华北农学报, 2011, 26 (增刊): 94-98.
- [41] 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 等. 氮肥对吉林玉米产量、农学效率和氮养分平衡的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016, (6): 93-98.
- [42] 赵春晓, 郑海春, 郜翻身, 等. 不同处理对河套灌区玉米土壤硝态氮和铵态氮动态及氮肥利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (6): 99-105.

Effects of nitrogen application regime on yield and residual nitrogen in yellow sloping soil

ZHANG Bang-xi^{1, 2, 3}, FAN Cheng-wu¹, LI Guo-xue³, WANG Wen-hua¹, ZHOU Rui-rong¹, HU Gang¹, QIN Song^{1, 2*}

[1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guizhou Guiyang 550006; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guizhou Guiyang 550006; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193]

Abstract: This study aimed to investigate a reasonable application of nitrogen fertilizer in wheat-maize rotation system on yellow sloping soil to achieve an agricultural sustainability and environment-friendly nitrogen application. A field experiment was conducted to study on the environmental endurance and optimal input rate of nitrogen in a maize-wheat rotation system with different nitrogen amounts (0, 146, 195, 244, 293 and 390 kg/hm²) in maize season and those (0, 90, 120, 150, 180 and 240 kg/hm²) in wheat season. Results showed that the grain yield and total nitrogen accumulation in plants increased and then decreased when the nitrogen application rate was continuously increased. Annual nitrogen use efficiency was less than 25%. Most of nitrogen that resided in soil were NO₃⁻-N, which increased with increasing nitrogen application rate. Indeed, there was a positive correlation (R²=0.746 3) between the accumulated NO₃⁻-N in 0 ~ 100 cm soil and annual nitrogen rate. Nitrogen in the surface soil was indiscernibly, while that in 0 ~ 100 cm depth of soil was considerably affected by nitrogen application rate. The annual yield was 3 784.8 ~ 3 888.2 kg/hm² and the annual accumulated NO₃⁻-N in the 0 ~ 100 cm depth of yellow sloping soil was 217.5 ~ 228.9 kg/hm² when annual nitrogen application rate was increased in the range of 225.6 ~ 264.6 kg/hm². Results suggested that increasing nitrogen fertilizer in the aforementioned range only resulted in the increase of accumulated NO₃⁻-N in 0 ~ 100 cm depth of soil at an average rate of 0.29 kg/kg, and thus, which can be optimal nitrogen application rate to the wheat-maize rotation system for sustainable agricultural development in areas with yellow sloping soil.

Key words: nitrogen application; yellow sloping soil; yield; inorganic nitrogen; wheat-maize rotation system