

下辽河平原不同水-肥条件下玉米地土壤养分收支 及氮肥利用效率

马 强, 宇万太, 张 璐, 沈善敏, 周 桦

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 【目的】了解下辽河平原地区施肥与水分条件对玉米地土壤中氮、磷、钾养分收支以及氮肥利用效率的影响。【方法】利用持续 16 年的长期田间试验结果结合气象观测资料, 对不同水肥条件下玉米农田养分收支与氮肥利用效率进行研究。【结果】施肥条件差异可使玉米移出农田的养分量高出无肥处理 2~3 倍。水分条件对农田养分移出量的作用虽不如施肥明显, 但在较好的降水条件下, 即使较为理想的施肥模式, 玉米地土壤中养分仍有可能出现赤字; 氮肥的施用加剧了土壤磷的赤字, 而氮、磷肥施用可加剧土壤钾收支赤字, 有机肥的施用可以使养分收支赤字得到缓解; 水分条件的改善则加速了养分收支赤字的出现, 但适宜的水分供给对氮肥利用效率的提高作用显著。【结论】在下辽河平原地区, 水肥条件对玉米土壤养分收支有显著影响, 水分条件适宜土壤养分收支出现赤字的可能性增大, 但保持农业系统养分循环再利用并根据土壤肥力适当施用化肥, 既可满足作物丰产的养分需求又有利于平衡土壤养分收支, 提高氮肥利用效率, 减少农业对环境的影响。

关键词: 下辽河平原; 玉米; 长期田间试验; 降水; 施肥; 土壤养分收支; 氮肥利用效率

Effect of Precipitation and Fertilization on Maize Farmland Nutrient Budget and Fertilizer-Nitrogen Use Efficiency in Low Reach of Liaohe River Plain

MA Qiang, YU Wan-tai, ZHANG Lu, SHEN Shan-min, ZHOU Hua

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: 【Objective】The objectives of this paper are to elucidate the effects of nutrient-water on the nutrient budget of N, P, K and the fertilizer-nitrogen use efficiency in farmland soil. 【Method】The effects were studied by the information of long-term field trial and meteorological observation data. 【Result】The quantity of nutrients uptaken by maize were more significantly influenced by fertilization than precipitation, and increased by two or three times with different fertilization conditions. It was also possible that the deficit of soil nutrient appeared with proper precipitation, even under the best fertilization pattern. N fertilizer resulted in higher deficiency of soil P; and the fertilizers of N and P resulted in higher deficiency of K. Nutrient deficiency in soil were getting smaller with manure application. It is easy to occur nutrients deficiency with precipitation condition improvement. The appropriate precipitation can improve fertilizer-nitrogen use efficiency significantly. 【Conclusion】In Low Reach of Liaohe River Plain, soil nutrient budget in maize farmland was influenced by water and fertilization conditions obviously. There was a high possibility that the nutrient deficiency would appear in normal precipitation year. The use of recycled nutrients in the farming systems with appropriate amount of fertilizer applied according to the soil nutrient supplying ability not only could produce high crop yield, but also beneficial to the balance the soil nutrient budget and improve fertilizer-nitrogen use efficiency, so there were no significant surplus of nutrients which may emit or leach out of soil into environment.

Key words: Low Reach of Liaohe River Plain; Maize; Long-term field trial; Precipitation; Fertilization; Soil nutrient budget; Fertilizer-nitrogen use efficiency

收稿日期: 2007-07-19; 接受日期: 2007-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701067); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-407)和国家科技支撑计划课题(2006BAD05B01)

作者简介: 马 强(1978-), 男, 辽宁鞍山人, 助理研究员, 研究方向为农业生态系统水分、养分管理。Tel: 024-83970366; E-mail: qma@iae.ac.cn。
通讯作者宇万太(1964-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 研究方向为农业生态系统养分循环。Tel: 024-83970366; E-mail: wtyu@iae.ac.cn

0 引言

【研究意义】农业生态系统养分收支平衡对维持系统功能、提高养分利用效率与系统生产力、保持系统可持续性有重大影响,同时也决定着土壤肥力的发展方向^[1]。中国主要农区正处在从传统农业向现代集约农业转变的过程中,生态系统开放度加大,一些农田养分收支失衡,局部环境养分富集甚至导致污染状况发生^[2]。因此,土壤养分收支状况及影响因子的深入研究,对了解农业生态系统养分循环特征,明确土壤肥力的变化趋势,提高人类对土壤肥力管理与调控的自觉性,减少农业对环境的污染,提高土壤养分的利用效率有指导意义。【前人研究进展】施肥制度与水分条件是影响土壤养分收支最为重要的两个因子。施肥对土壤养分收支的影响是直接的^[3],可影响养分在作物体内转运与积累的进程,适宜的养分条件不仅可改善同化产物在籽实、秸秆与根中的分配比例^[4],还对作物渗透调节能力^[5]、气孔导度^[6]、光合活性^[7,8]等均有显著影响,从而影响作物产量与养分携出量。水分条件主要对土壤养分的有效性^[9]、作物生长与养分吸收^[10]以及养分在作物体内分配等产生影响^[11],进而对因作物收获移出农田的养分量产生影响。可见,施肥与水分条件均可对因收获移出农田的养分量产生显著影响,并最终影响农田生态系统的养分收支平衡。

【本研究切入点】下辽河平原地区耕地面积 209×10^4 ha,是辽宁省粮食主产区。玉米为该地区主栽作物,种植面积超过农作物总播种面积的 50%,占粮食作物播种面积的 64%^[12]。针对这一地区旱田主要为玉米连作的农业生产特点,利用位于下辽河平原的中国科学院沈阳生态试验站一组已进行 16 年的长期土壤肥力试验,结合同时期气象观测资料,以不同施肥制度及不同降水条件对玉米地土壤养分收支的影响为切入点,对玉米地土壤养分收支状况与氮肥利用效率进行研究,并根据研究结果分析长期试验所模拟各施肥制度的优劣。【拟解决的关键问题】旨在揭示不同水-肥条件对玉米地土壤养分收支状况及氮肥利用效率的影响,以探求较理想的施肥模式,为提高肥料利用效率、降低施肥带来的环境风险提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

中国科学院沈阳生态试验站位于下辽河平原北部,沈阳市南约 35 km,土壤为潮棕壤,土壤有机质

含量 $22.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 6.7。站区多年平均年降水量为 650~700 mm,玉米生长季(5~9 月)降水约占全年降水的 80%左右,年相对降水变率^[13]平均为 18%,春、秋两季相对降水变率大于玉米生长旺季(6~9 月),分别为:春季 28%;秋季 42%;玉米生长旺季 22%。

1.2 试验设计

试验始于 1990 年,由于试验初期,各处理均处于匀地阶段,因此为得到稳定、可靠的试验结果,研究使用 1993 年以后的产量数据进行分析。试验共设 12 个处理,本次研究采用前 8 个处理,分别为: I. 对照(CK),不施肥; II. 循环(猪圈肥),收获的籽实 80%喂猪,大豆秸秆全部和玉米秸秆的一半经粉碎后垫圈,翌年春猪圈肥循环返回本处理; III. N,施氮肥 $150 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ (肥料为尿素); IV. N+循环,氮肥用量同 III,循环方法同 II; V. NP,氮肥用量同 III,施磷肥 $17.9 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ (1990~1996 年),1997 年后调整为 $25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (肥料为重过磷酸钙); VI. NP+循环, N、P 用量同 V,循环同 II; VII. NPK, N、P 用量同 V,施钾肥 $60 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$ (肥料为硫酸钾); VIII. NPK+循环, NPK 同 VII,循环同 II。各处理 3 次重复,分别种植大豆-玉米-玉米,并按一定顺序进行轮换,小区面积 162 m^2 ,本研究中的产量为两个玉米小区产量的平均值。

1.3 研究方法

玉米植株样品分解为籽实和秸秆两部分,秸秆包括籽实以外的其它收获部分,但不包括根茬和根。分解后籽实、秸秆经烘干、粉碎、混匀后取样装瓶保存,分析前进一步粉碎并经 70°C 烘干 4~6 h。分析方法:植物全氮含量用凯氏法;植物全磷含量用硫酸联合消解,钼蓝比色法;植物全钾含量用三酸消解,火焰光度法;根据籽实、秸秆产量和所含养分的浓度计算养分移出量;循环回田猪圈肥中养分量是按每年猪圈肥产量(干重)和其养分浓度的测定结果计算所得。

为方便研究水分条件(降水)和土壤肥力这两个因素对玉米生长及养分吸收的影响,将历年玉米生长期(5 月 1 日至 9 月 30 日)降水量划分为 4 个等级:旱年($<400 \text{ mm}$),平水年($400 \sim 550 \text{ mm}$),丰水年($550 \sim 650 \text{ mm}$)和涝年($>650 \text{ mm}$)^[14],同时利用彭曼模型对各降水典型年份玉米生长季农田可能蒸散量进行估算^[15~17],结果如表 1。

可以看出,干旱年份农田可能蒸散量远远大于同时期降水量,玉米对水分的需求无法得到满足,显著

表 1 下辽河平原地区典型降水年份玉米生长季农田可能蒸散量 (mm)

Table 1 Potential evapotranspiration during maize growing season in typical precipitation year in Low Reach of Liaohe River Plain

	1997 旱年 Arid year in 1997	2004 平水年 Normal precipitation year in 2004	2005 丰水年 Higher precipitation year in 2005	1995 涝年 Flood year in 1995
降水量 Precipitation	357	460	605	763
可能蒸散量 Potential evapotranspiration	575	514	469	476

影响作物产量; 而涝年与丰水年, 农田可能蒸散量低于同时期降水, 由于降水较多, 很可能导致光、热等条件不利于作物生长, 尤以涝年, 农田水明显过剩, 对玉米产量影响更为显著; 平水年份, 农田可能蒸散量略高于同时期降水, 作物生长所需的光、热等条件也较为适宜, 使这种年景条件下作物产量达到最高。

2 结果与分析

表 2 不同降水年各施肥处理玉米籽实平均烘干产量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Table 2 Oven dried grain yields of maize with different fertilization treatments and precipitation

处理 Treatment	旱年(2) Arid year	平水年(5) Normal precipitation year	丰水年(4) Higher precipitation year	涝年(2) Flood year	加权平均 Weighted average
I	2380±761Aa	4150±1210Ca	3730±1290Ba	2660±1320Aa	3520a
II	3370±871Aab	5760±1440Cb	5270±1040Bb	4240±929Abc	5000b
III	3600±787Aab	6780±646Cc	5740±904Bbc	3030±1810Aab	5400bc
IV	4130±1345Ab	8210±555Cde	7250±480Bde	4670±920Acd	6740d
V	4190±673Ab	7590±459Cd	6560±707Bcd	4640±807Acd	6300cd
VI	4460±745Ab	8400±534Ce	7200±479Bde	5530±754Acd	6980d
VII	4270±971Ab	8430±583Ce	7560±610Be	5410±423Acd	7060d
VIII	4800±1180Ab	8700±429Ce	8040±627Be	5910±287Ad	7470d

括号中数值为不同降水年份出现年数; 平均值±标准差; 大写字母不同, 表示水分条件不同引起产量之间的差异显著; 小写字母不同, 表示施肥不同引起产量之间的差异显著; 显著性水平 $P<0.05$ 。下同

Figure in parenthesis is the number that appear in different precipitation years; Average ± standard deviation; The significances different precipitation and fertilizer were showed by capital letters and small letters, respectively; the significant differences were showed by different letters in table; significant at $P<0.05$ level. The same as below

2.2 不同水-肥条件下土壤养分移出量

施肥制度不同显著影响玉米生长和产量, 从而影响养分移出量。化肥和猪圈肥的施用使相应处理玉米的收获养分量有较大幅度的提升, 在本试验最佳施肥条件下(处理 VIII, NPK+猪圈肥)玉米收获移出的氮、磷、钾养分量相当于对照处理的 2~3 倍。

降水条件也可显著影响玉米的生长与产量, 从而影响玉米收获而带走的养分量。在下辽河平原, 平水年玉米产量最高, 移出氮、磷、钾养分量也达到最高, 丰水年次之, 旱涝年玉米地土壤的养分移出量最低。

同时, 通过对不同降水条件下, 各处理年收获移

2.1 降水量与施肥对玉米产量的影响

通过不同降水年景各处理玉米产量的统计资料(表 2)可以看出: 对于水分, 不论土壤肥力高低, 玉米良好生长均需要一个适宜的水分条件, 在这里以平水年产量最高, 缺水干旱或水分过多均可影响玉米产量; 对于养分, 则不论降水丰欠, 充分的养分供给如 NPK 处理和 NPK+猪圈肥处理, 均可显著提高玉米产量; 单施氮肥在不同水分年景也均有显著增产效果, 惟以平水年增产幅度最大, 以涝年最小。

出养分量之间差异与各处理多年加权平均移出养分量之间差异的显著性进行分析可以发现, 旱、涝等水分条件较差的年份, 玉米年收获移出养分量处理间差异显著性低于水分条件较好的年景, 造成不同处理多年年均养分移出量差异显著性下降。可见, 差异的主要贡献来自于平、丰水年; 也说明较好的水分条件, 有利于发挥肥料的增产作用, 提高作物对肥料的利用效率, 在该地区尤以平水年最为显著; 而较差的水分条件, 肥料促进作物生长、提高作物产量的作用没有很好的发挥出来(表 2), 致使处理间养分移出量的差异不及平、丰水年份明显。

表 3 不同施肥处理与降水条件下玉米地年均养分移出量 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 3 Average quantity of plant nutrients removed by maize from soil in different fertilization treatments and precipitation

养分 Nutrient	施肥处理 Treatment	早年 Arid year	平水年 Normal precipitation year	丰水年 Higher precipitation year	涝年 Flood year	加权平均 Weighted average
氮 N	I	41.1±5.0 Aa	64.7±17.4 Ba	66.5±21.0 Ba	50.9±17.7 ABa	59.5 a
	II	58.0±6.8 Ab	92.5±27.7 Bb	94.9±25.2 Bb	78.9±16.8 ABb	85.8 b
	III	69.8±7.5 Abc	124.8±22.3 Bc	116.0±16.4 Bc	76.2±29.4 Aab	106.2 bc
	IV	77.1±8.2 Acd	157.5±16.4 Cde	153.1±16.9 Cde	106.1±17.3 Bcd	135.9 de
	V	84.7±1.9 Ade	145.3±13.1 Bd	135.5±19.5 Bcd	98.6±12.6 Abc	125.8 cd
	VI	95.0±12.5 Ae	169.9±14.2 Cef	158.1±17.3 Ce	119.9±16.7 Bcd	147.0 de
	VII	91.9±11.6 Ae	167.3±13.7 Cef	156.7±17.5 Ce	117.1±8.7 Bcd	144.7 de
	VIII	108.0±10.8 Af	177.2±14.5 Cf	180.3±23.8 Cf	129.9±13.3 Bd	160.2 e
	平均 Average	78.2A	137.4B	132.6B	97.2A	-
磷 P	I	9.0±2.3 ABa	12.3±2.7 Ba	12.8±4.8 Ba	7.6±3.2 Aa	11.2 a
	II	12.0±2.5 Aabc	17.7±3.3 Bb	18.3±4.7 Bbc	11.7±2.0 Ab	16.1 bc
	III	11.6±2.0 Aab	17.6±3.6 Bb	16.6±5.3 Bab	7.4±2.3 Aa	14.8 ab
	IV	13.7±4.2 Abcd	20.9±2.0 Bc	20.7±3.4 Bbc	11.5±1.2 Ab	18.3 bcd
	V	16.2±1.9 Acde	22.6±5.0 Bcd	22.2±4.9 Bcd	11.6±1.4 Ab	19.8 cde
	VI	17.2±1.6 Ade	26.3±3.3 Bef	26.4±3.2 Bde	14.3±1.2 Abc	23.1 ef
	VII	15.7±1.8 Abcde	24.4±2.5 Bde	25.7±2.3 Bde	13.9±1.0 Abc	21.8 def
	VIII	18.9±4.1 Ae	28.2±4.0 Bf	28.2±3.9 Be	16.1±1.1 Ac	24.9 f
	平均 Average	14.3A	21.3B	21.4B	11.8A	-
钾 K	I	20.0±4.2 Aa	32.2±5.4 Ca	28.1±4.4 BCa	22.0±6.1 ABa	27.5 a
	II	24.8±6.2 Aab	42.4±5.4 Cb	35.7±5.0 Bab	33.7±4.5 Bbc	36.3 b
	III	26.2±2.2 Aab	41.5±5.3 Bb	38.0±7.4 Bbc	25.2±7.0 Aa	35.5 ab
	IV	31.6±8.1 Abc	50.0±6.1 Bc	45.7±6.9 Bcd	37.3±4.2 Ac	43.9 bc
	V	24.8±1.9 Aab	42.0±8.3 Bb	40.9±9.9 Bbc	28.7±4.5 Aab	37.0 b
	VI	31.2±5.5 Abc	50.8±7.7 Bc	46.7±8.3 Bcd	33.5±6.0 Abc	43.9 bc
	VII	31.4±3.5 Abc	54.6±6.1 Bc	51.2±10.0 Bd	35.5±0.7 Abc	47.0 c
	VIII	38.8±10.5 Ac	68.5±9.3 Bd	60.3±15.5 Be	37.8±3.8 Ac	56.7 d
	平均 Average	28.6A	47.8B	43.3B	31.7A	-

2.3 不同水-肥条件下土壤养分收支

根据施肥输入养分量实测结果(表 4)与土壤养分移出量计算玉米地土壤养分收支状况,结果如图 1~3,其分别表示 1993~2005 年的 13 年间不同降水与施肥条件下土壤中氮、磷、钾年平均养分收支。其中正项为土壤养分输入大于养分移出,负项则相反。一个可视为养分收支结构合理的施肥模式,应满足以下一些最基本的条件:较高的作物产量、较低的施肥成本、有利培育土壤和养分尽可能少地进入环境等等。本试验中化肥氮、磷、钾的施用量是按当地施肥习惯与作物达到高产时的养分移出量设计的(表 3),对于玉米是 $\text{N } 150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 、 $\text{P } 25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 、 $\text{K } 60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;如玉米生长正常达到高产,则化肥施入的养分量与玉米收获移出的养分量大抵相当,收支平衡,没有浪费,

不构成对环境污染的威胁。猪圈肥的施用是对中国农业中传统施肥的模拟,在本试验的 4 个处理中,循环猪圈肥是额外的养分输入,有助于培育土壤肥力。比较各处理的养分收支特征,处理 VIII(NPK+循环猪圈肥)显然是最优的施肥模式,玉米产量高,N、P、K 3 种元素均略有盈余,但未达到盈余过度,不至于影响环境;处理 VII(NPK)的玉米产量也可达到高产,不过因缺有机肥施用,对培育土壤肥力的作用必定略为逊色;处理 VI(NP+循环猪圈肥),不论玉米产量、养分盈余,还是对土壤肥力的作用,略较处理 VIII 逊色,不过钾存在微小的收支赤字,长此以往是否会危及土壤的钾供给力,有待继续观察研究。其余处理存在某一元素明显的收支赤字,对土壤养分的全面供给、均衡培育不利。

表 4 不同施肥与降水条件下玉米地养分年均输入量 (13 a)

Table 4 Average input of nutrients in different fertilization treatments and precipitation (kg·ha⁻¹·a⁻¹)

养分 Nutrient	施肥处理 Treatment	早年 Arid year	平水年 Normal precipitation year	丰水年 Higher precipitation year	涝年 Flood year
氮 N	I	0.0	0.0	0.0	0.0
	II	49.3(49.3)	40.3(40.3)	29.2(29.2)	60.7(60.7)
	III	150	150	150	150
	IV	204.9(54.9)	203.8(53.8)	183(33.0)	226.8(76.8)
	V	150	150	150	150
	VI	202.4(52.4)	203.7(53.7)	188.2(38.2)	227.9(77.9)
	VII	150	150	150	150
	VIII	206.5(56.5)	206(56.0)	192.5(42.5)	238.4(88.4)
磷 P	I	0.0	0.0	0.0	0.0
	II	9.1(9.1)	8.1(8.1)	6.7(6.7)	10.1(10.1)
	III	0.0	0.0	0.0	0.0
	IV	9.4(9.4)	10.7(10.7)	7.5(7.5)	10.4(10.4)
	V	25.0	23.6	23.2	17.9
	VI	36.8(11.8)	37.1(13.5)	33.0(9.8)	32.1(14.2)
	VII	25.0	23.6	23.2	17.9
	VIII	37.4(12.4)	38.1(14.5)	35.2(12.0)	34.3(16.4)
钾 K	I	0.0	0.0	0.0	0.0
	II	17.7(17.7)	25.9(25.9)	19.3(19.3)	35.9(35.9)
	III	0.0	0.0	0.0	0.0
	IV	19.6(19.6)	27.8(27.8)	19.7(19.7)	49.7(49.7)
	V	0.0	0.0	0.0	0.0
	VI	21.0(21.0)	33.4(33.4)	22.0(22.0)	56.5(56.5)
	VII	60.0	60.0	60.0	60.0
	VIII	93.8(33.8)	95.5(35.5)	88.6(28.6)	114.8(54.8)

输入养分量结果括号内为猪圈肥提供的养分 Figure in parenthesis is nutrient of pig manure

无化肥氮的处理, 土壤中氮收支常年赤字, 尤其在平、丰水年份, 随作物产量的提高, 收获移出的氮素增多, 土壤中氮匮乏加剧, 这不仅明显影响作物产量的提高, 而且对于培肥土壤、提高土壤质量均有不利的影响。土壤中磷收支的情况与氮相似, 化肥磷的投入是土壤磷收支平衡的重要条件; 同时, 值得注意的是即使化肥供应均衡的处理VII, 氮、磷在平、丰水年份收支仍出现赤字; 从试验期间降水情况来看, 该地区平、丰水年份出现概率大致为 70%, 因此, 若继续维持这种施肥模式, 农田氮、磷养分是否有可能出现亏缺有必要进一步研究。

供试土壤相对富钾, 同时, 随着循环回田有机肥的施入, 土壤中钾素收支赤字得到一定程度的缓解, 但氮与磷肥的施入使土壤中钾素收支赤字加剧, 而随着化肥钾的施入, 无论在何种降水年份, 玉米地土壤中钾均可达到收支平衡且略有盈余。

图 1~图 3 也显示降水过多或不足可影响土壤的养分收支结构, 不过在下辽河平原, 出现旱、涝年的

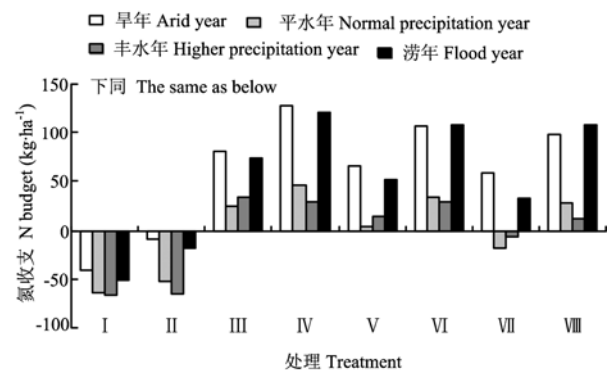


图 1 不同施肥处理与降水条件下年均氮素养分收支

Fig. 1 Annual input and output of N in different fertilization treatments and precipitation

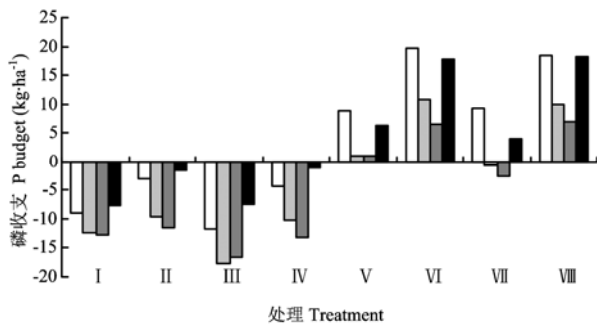


图2 不同施肥处理与降水条件下年均磷素养分收支

Fig. 2 Annual input and output of P in different fertilization treatments and precipitation

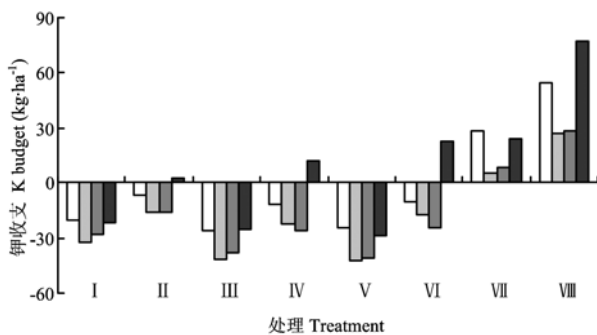


图3 不同施肥处理与降水条件下年均钾素养分收支

Fig. 3 Annual input and output of K in different fertilization treatments and precipitation

频率约各占 0.15，几乎不会发生连续的干旱年或涝湿年，所以此种影响是短暂的。

2.4 不同水-肥条件下玉米地氮肥利用效率

表5 不同水-肥条件玉米地氮肥利用效率 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$)

Table 5 Nitrogen use efficiency in different fertilization treatments and precipitation

施肥处理 Treatment	旱年 Arid	平水年 Normal precipitation	丰水年 Higher precipitation	涝年 Flood	加权平均 Weighted average
II	20.1Ab	39.9ABc	52.5Bb	26.0Ac	38.6c
III	8.1ABa	17.6Ba	13.4ABa	2.5Aa	12.5a
IV	8.5Aa	19.9Bab	19.2Ba	8.9Aab	16.2ab
V	12.1Aa	23.0Bab	18.8Aa	13.2Aab	18.5ab
VI	10.3Aa	20.9Bab	18.4ABa	12.6ABab	17.2ab
VII	12.6Aa	28.5Bb	25.5Ba	18.4ABbc	23.6b
VIII	11.7Aa	22.1Bab	22.4Ba	13.6ABab	19.3ab
平均值 Average	11.9A	24.6B	24.3B	13.6A	-

在生产实践中，要达到两个目标，一是提高施入肥料的增产报酬——通常可用肥料养分的作物利用效率即以每千克肥料养分增产籽实的千克数表示。二是粮食的产量水平达到经营者的期望目标。因此，一个好的施肥模式应既能满足作物高产的养分供给，又能保持较高的肥料养分利用效率，减少肥料养分损失，减轻农业生产给环境带来的压力。本研究中氮肥利用效率采用差值法进行计算，表5的计算结果显示，处理II循环猪圈肥中氮素的作物利用效率显著高于其它各处理，猪圈肥中每千克N可增产20~53 kg玉米籽实，不过该处理的玉米单产太低 ($3\sim 5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$)，不能视为良好的施肥模式。处理VIII (NPK+猪圈肥)、处理VII (NPK)、处理VI (NP+猪圈肥)等的氮肥利用效率均相当高，且玉米单产达到了高产水平，可视为较优的施肥模式。

降水丰、欠影响玉米产量，从而影响玉米对肥料氮的利用效率，在本研究中，不同降水年份玉米对肥料氮的利用效率高低之间可相差1倍，存在显著差异；尤其平水年份，除处理II以外，其它各处理氮肥利用效率均处于最高水平，由此在该地区平水年份对玉米生产最为有利，同时也最有利于提高肥料利用效率，这可能是因为平水年份除水分条件已能够满足当地玉米生长所需外，光、温等条件较其它降水年份更适合玉米生长和产量形成的缘故。可见，在生产中，对具备水分供排条件的农田实施旱时灌、涝时排的农田水分管理对策，对于大幅度提高玉米产量和提高玉米的氮肥利用效率必将有积极的作用。

3 讨论

中国农业中化肥的施用大体是按20世纪50~60

年代施用氮肥、70~80 年代施用氮、磷肥、80~90 年代施用氮、磷和钾肥这一时间序列发展的^[18]。本试验处理Ⅲ、Ⅴ、Ⅶ可代表上述不同年代的化肥施用模式, 处理Ⅳ、Ⅵ、Ⅷ则分别代表了施肥不同阶段化肥和循环回田有机肥相结合的施肥模式。由图 1~图 3 可见, 不同施肥模式可对玉米地土壤养分状况产生不同影响: 氮肥的单独施用可加剧土壤中磷、钾养分的赤字, 若氮、磷并用, 则进一步加剧土壤中钾的收支赤字; 保持系统中养分的循环再利用, 可以缓解但不能从根本上消除土壤钾乃至磷的收支赤字。这说明如果忽视磷、钾肥的施用, 只注意氮肥, 会导致农田土壤中缺磷、缺钾, 使之成为限制这一地区农田生产力提高的关键因子。本试验的结果也为建立平衡的养分供给模式、合理的施肥制度提供了依据。

对于水分而言, 适宜的水分条件在增加作物产量的同时可加剧土壤养分收支的赤字。研究发现水分供给较好的平、丰水年份, 无论何种施肥方式, 养分移出量均显著大于旱、涝年份, 这是因为水分条件改善, 使玉米生物产量大大提高, 随收获物移出农田的养分量亦随之提高。

肥料的合理施用与土壤肥力优化管理要求施肥在充分满足作物对养分的需求和有利土壤养分库的维护外, 还应避免土壤中过剩养分进入环境而导致环境污染。现在农业生产上普遍存在氮肥用量大, 施用方式不合理等问题, 既浪费氮肥, 降低了利用效率和经济效益, 又给环境带来巨大的压力。而提高氮肥利用效率, 不能简单采取降低氮肥用量、消耗土壤氮素的途径, 应追求在氮肥用量适宜的基础上, 通过肥料合理配施来真正提高氮肥的利用率, 减少氮肥的损失和向环境的扩散^[19], 获得较高的作物产量。本研究结果也表明虽然处理Ⅱ氮肥利用率最高, 但由于该施肥模式下玉米产量低, 因此不能作为合理施肥模式; 而处理Ⅶ、Ⅷ施肥模式, 不仅可以得到较高作物产量, 氮肥利用率也高于其它处理, 可见均衡合理的养分供给有利于氮肥利用率的提高; 同时, 水分条件的改善明显提高了氮肥的利用率。

4 结论

施肥模式的优化选择, 需经漫长岁月从各个方面审视其优劣, 方能获得较全面的认识。本文对中国农业发展过程中曾出现过的 8 种基本施肥模式, 从农田土壤养分收支结构、肥料氮的作物利用效率等方面进行了比较、研究, 可以看出在保持农业系统养分循环

再利用, 即循环有机肥使用这一中国施肥传统基础上, 按丰产作物的养分需要量施用化肥, 可获得高的作物产量和较高的氮肥利用效率; 这种施肥模式也将有利于土壤肥力培育和减轻肥料对环境造成的压力, 后者有待专文讨论。同时, 良好的水分条件亦有利于作物生长与肥料增产作用的发挥, 而随农田排灌条件改善, 玉米产量提高, 收获移出土壤的养分量将随之增加, 在目前施肥水平上进一步提高养分投入量势在必行。

References

- [1] 宇万太, 张 璐, 殷秀岩, 马 强, 沈善敏. 下辽河平原农业生态系统不同施肥制度的土壤养分收支. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1571-1574.
Yu W T, Zhang L, Yin X Y, Ma Q, Shen S M. Effect of different fertilization system on soil nutrient budget. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1571-1574. (in Chinese)
- [2] 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统养分循环、平衡和调控研究. 土壤学报, 1998, 35(4): 501-509.
He Y Q, Huang X Q. Nutrient cycling, balance and regulation in red soil agroecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 501-509. (in Chinese)
- [3] 刘鸿翔, 王德禄, 王守宇, 孟 凯, 韩晓增, 张 璐, 沈善敏. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力质量变化 III. 土壤养分收支. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1410-1412.
Liu H X, Wang D L, Wang S Y, Meng K, Han X Z, Zhang L, Shen S M. Changes of crop yield and soil fertility under long-term application of fertilizer and recycled nutrients in manure on a black soil III. Soil nutrient budget. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1410-1412. (in Chinese)
- [4] 山 仑, 孙纪斌, 刘忠民, 杜守宇. 宁南山区主要粮食作物生产力和水分利用的研究. 中国农业科学, 1988, 21(2): 9-16.
Shan L, Sun J B, Liu Z M, Du S Y. A study on productivity and water use of main crops in southern Ningxia hilly area. *Scientia Agricultura Sinica*, 1988, 21(2): 9-16. (in Chinese)
- [5] Shimshi D. The effects of nitrogen supply on transpiration and stomatal behaviour of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *New Phytologist*, 1970, 69: 405-412.
- [6] 张雷明, 杨君林, 上官周平. 旱地小麦群体生理变量对氮素供应量的响应. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 63-65.
Zhang L M, Yang J L, Shangguan Z P. Effects of nitrogen nutrition on the physiological characteristics of wheat colony in dryland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 63-65. (in Chinese)

- [7] Berkowitz G A, Gibbs M. Effect of osmotic stress on photosynthesis studied with the isolated spinach chloroplast. *Plant Physiology*, 1982, 70: 1143-1148.
- [8] Morgan J A. The effect of N nutrition on the water relation and gas exchange characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*, 1986, 80: 52-58.
- [9] 汪德水, 程宪国, 张美荣, 周涌, 金轲. 肥水在农业生产中的相关效应研究. 见: 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 272-276.
Wang D S, Cheng X G, Zhang M R, Zhou Y, Jin K. A study on correlation effect of fertilizer and water in agricultural production. In: Wang D S. *The Principle of Relationship Between Fertilizer and Water of Dry Farming Land and Its Regulation Technology*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1995: 272-276. (in Chinese)
- [10] Campbell C A, Paw E A. Effects of fertilizer N and soil moisture on mineralization, N recovery and A-values, under spring wheat grown in small lysimeters. *Canadian Journal of Soil Science*, 1978, 58: 39-51.
- [11] 李世清, 李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 47-56.
Li S Q, Li S X. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer-use-efficiency. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994, 12(1): 47-56. (in Chinese)
- [12] 辽宁省统计局. 辽宁统计年鉴 2006. 北京: 中国统计出版社, 2006.
Liaoning Province Bureau of Statistic. *The Annals of Liaoning Province of Statistic 2006*. Beijing: China Statistic Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 李明秀. 衢州地区降水变率与降水变化规律分析. 浙江气象, 2006, 27(3): 10-12.
Li M X. Analysis on the variability and changes of precipitation in Quzhou area. *Zhejiang Meteorology*, 2006, 27(3): 10-12. (in Chinese)
- [14] 马强, 宇万太, 沈善敏, 张璐, 周桦. 下辽河平原水肥交互作用及对玉米产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(4): 29-33.
Ma Q, Yu W T, Shen S M, Zhang L, Zhou H. Effects of water and nutrient interaction on maize yields in lower reach of Liaohe River Plain. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4): 29-33. (in Chinese)
- [15] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989.
Pei B X. *Measurement and Calculation of Evaporation and Evapotranspiration*. Beijing: Meteorology Press, 1989. (in Chinese)
- [16] 王菱, 谢贤群, 李运生, 唐登银. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. 地理研究, 2004, 23(1): 45-54.
Wang L, Xie X Q, Li Y S, Tang D Y. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 45-54. (in Chinese)
- [17] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
Meng M, Ni J, Zhang Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6): 853-861. (in Chinese)
- [18] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Shen S M. *Soils Fertility of Chinese*. Beijing: China Agricultural Press, 1998. (in Chinese)
- [19] 郑永美, 丁艳锋, 王强盛, 李刚华, 吴昊, 袁奇, 王惠芝, 王绍华. 起身肥改善水稻根际土壤氮素分布与利用的研究. 中国农业科学, 2007, 40(2): 314-321.
Zheng Y M, Ding Y F, Wang Q S, Li G H, Wu H, Yuan Q, Wang H Z, Wang S H. Favorable effect of nitrogen before transplanting on nitrogen distribution and utilization efficiency in rice rhizosphere soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2): 314-321. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)