

河西农田磷钾养分平衡及肥料利用率长期定位研究^①

孙宁科¹, 李 隆^{2*}, 索东让¹, 王 谦²

(1 甘肃省张掖市农科院, 甘肃张掖 734000; 2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: 采用连续 24 年田间定位试验和养分差减法研究了河西农田磷钾养分投入产出平衡及肥料利用率, 结果表明, 磷素养分投入始终大于产出为正平衡, 化学磷肥连施(NP、NPK)平均盈余率 43.3% ~ 97.0%; 小麦、玉米化肥磷总利用率平均为 37.3% ~ 40.5% 和 22.3% ~ 30.5%, 比短期试验利用率分别增加 12.8% ~ 22.9% 和 5.9% ~ 9.5%。有机肥与化学磷肥配施(MNP、MNPk)平均盈余率 211.3% ~ 277.9%; 小麦、玉米磷素总利用率分别为 18.0% ~ 18.3% 和 16.3% ~ 19.4%, 比试验初利用率增加 5.4% ~ 8.5% 和 5.8% ~ 6.6%。连施有机肥适量减少化学磷肥用量是平衡施磷的科学之举。钾素投入始终不抵作物携带量, 农田钾素为负平衡, 长期施用有机肥(MN、MNP)不能平衡土壤钾素, 平均亏缺 -38.6% ~ -47.2%, 小麦、玉米作物有机肥钾总利用率 57.8% ~ 59.8% 和 34.1% ~ 54.1%, 比试验初增加 8.4% ~ 22.3%。连施化学钾肥平均亏缺 -36.2% ~ -67.8%, 小麦、玉米钾肥利用率 53.1% 和 29.5%, 比试验初增加 7.4% ~ 36.4%。在有机肥基础上增施化学钾肥是现代作物生产的必需措施。

关键词: 磷钾养分; 盈余率; 亏缺率; 肥料利用率

中图分类号: S153.6; S158.3

现代作物生产中, 科学施肥技术必须做到 3 个平衡, 即有机肥与无机肥平衡施用、作物需要的营养元素平衡及农田养分投入产出平衡, 是促进作物高产稳产、提高肥料利用率、减少养分损失、保持生态环境安全的根本措施。因此深入研究养分投入产出平衡状况和肥料利用率, 对于明确施肥对土壤环境质量、施肥效益和土壤持续供肥能力的影响, 具有重要的意义^[1-4]。本项研究利用位于河西的连续 24 年的田间长期定位试验, 对土壤中磷钾养分平衡状况及肥料利用率进行了系统研究, 为平衡施肥技术提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设在河西走廊中部的张掖市农科所田间试验站。该地区为荒漠干旱区的内陆河灌区, 施肥水平与栽培技术与当地农业生产发展同步, 春小麦、玉米占栽培面积的 80%。该试验地土壤为灌漠土, 质地为中壤。试验布设之前的耕层土壤有机质含量为 20.8 g/kg, 全氮含量为 0.76 g/kg, 全磷含量为 0.82 g/kg, 速效钾含量为 99.1 mg/kg。

1.2 试验设计与施肥

田间试验为裂区设计, 主处理为不施有机肥和施有机肥(M), 副处理为不施肥(CK), 单施氮素化肥(N), 氮磷化肥(NP)、氮磷钾化肥(NPK), 每个处理重复 3 次, 在田间布设处理时, 进行区组控制, 随机排列, 试验小区面积为 33.3 m², 小区之间修筑永久性地埂和灌水渠道。小区中作物的轮作方式分为两个阶段, 1982—2006 年以春小麦—春小麦—玉米的方式轮作, 2007—2008 年为小麦/玉米带田。农田为水浇地, 在小麦生育期, 灌水 3 ~ 4 次; 在玉米生育期, 灌水 5 ~ 6 次。

单作小麦施氮量为 120 ~ 180 kg/hm², 施磷量为 26.2 ~ 39.3 kg/hm², 施钾量为 49.8 ~ 74.7 kg/hm², 均作基肥。单作玉米作物施肥量分别为小麦施肥量的 2 倍, 氮、钾肥基施和深追施各占总施肥量的 50%, 磷肥均基施。小麦/玉米带田氮肥施用量为 600 kg/hm², 磷、钾肥施用量为氮肥用量的 50%。有机肥为农家肥, 其有机质平均含量为 32.2 g/kg、全氮为 2.079 g/kg、全磷为 1.179 g/kg、有效氮为 220.5 mg/kg, 速效磷为 105.7 mg/kg, 速效钾为 1 797 mg/kg, 1982—1990 年每年施用量为 60 t/hm², 1991—2005 年每年施用量为

基金项目: 国家科技支撑计划“十二五”循环农业项目(2012BAD4B04-2)资助。

* 通讯作者(lilong@cau.edu.cn)

作者简介: 孙宁科(1967—), 男, 陕西彬县人, 副研究员, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: zysnk1967@163.com

75 t/hm², 均作为基肥。

1.3 样品采集与测定

长期定位试验于 1982 年开始布设, 施肥水平、作物品种、栽培技术与当地农业发展水平同步, 田间管理与大田生产同类作物一致。试验均按小区单独操作, 作物成熟后单收单脱, 分别计籽粒和生物学产量。在成熟期, 按小区考察作物生物学性状, 测定经济系数。每个轮作期按处理, 采取小麦、玉米样品。在甘肃省农科院测定中心, 测定作物籽粒及秸秆样品中氮、磷、钾养分含量。

1.4 数据分析

采用 SPSS 15 统计分析软件, 对数据进行方差分析与统计检验。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对作物产量及磷、钾养分携带量的影响

作物养分携带量=作物籽粒产量×籽粒养分含量+秸秆产量×秸秆养分含量, 它是指作物地上部携带量, 不计留在土壤中的根茬吸收量。作物籽粒产量是田间试验实际测定结果, 秸秆产量由历年测定的经济系数平均值估算, 小麦和玉米的经济系数分别按 0.40 和 0.50 计。从各轮作期产量结果来看(表 1), 在各轮作期中, 不同施肥处理间作物产量存在一定的差异。在 1982—1984 年的轮作期中, MN、NPK 和 MNPK 等 3 个处理的作物产量相近, 没有显著的差别; 在 1985—1987 年轮作期中, NP 与 NPK 处理间、MNP 与 MNPK 处理间的作物产量未表现出明显的差异; 在 1988—1990 年轮作期中, NP 与 MN 处理间、MNP 与 MNPK 处理间的作物产量没有明显的差别; 在 1991—1993

年轮作期中, NPK 与 MN 处理间、MNP 与 MNPK 处理间的作物产量没有显著的区别; 在 2000—2002 年轮作期中, MN 与 NPK 处理间的作物产量差异不显著, 这些结果表明了在一些年份中, 氮磷化肥配施、氮磷钾化肥配施及有机肥与氮磷或氮磷钾化肥配施对作物的产量效应基本相近。在 1994—1996 年、1997—1999 年、2003—2005 年和 2006—2008 年的 4 个轮作期中及 1982—2008 年的长期试验期间, 不同施肥处理下作物产量具有显著的差异。从不同施肥对作物增产的效果来看, 有机肥与化肥配合施用的产量大于单独化肥处理, 居最高水平; 化肥养分平衡施肥条件(NPK), 作物产量较高, 而且相对稳定。施磷肥比无磷处理显著地提高产量, 施钾也有较明显的增产趋势。有机肥、氮素化肥长期单施产量水平较低, 作物产量是下降的趋势。作物磷钾养分含量表现出施磷处理含磷量大于无磷处理, 施钾处理含钾量大于无钾处理。有机肥与磷、钾养分配合施用(MNP、MNPK)其磷钾养分含量分别大于磷钾化肥处理。本项研究历时较长, 形成了不同施肥处理、不同时期之间的差异^[2]。作物对磷钾养分携带量表现出与作物产量基本一致的趋势。施磷素化肥处理比无磷处理携带量平均增加 79.8% ~ 137.6%, 有机肥与磷配施携带量比磷素化肥处理平均增加 21.6% ~ 37.9%, 比有机肥处理增加 12.6% ~ 35.3%。施钾素化肥携钾量平均增加 20.6% ~ 23.2%; 有机肥与钾素化肥配施比有机肥、钾素化肥处理分别平均增加携钾量 6.9% ~ 11.3% 和 23.1 ~ 33.3%。从变化动态来看, 作物磷、钾携带量与产量变化趋势基本相似, 施磷处理携磷量、施钾处理携钾量是逐步增加的趋势, 无磷、钾处理携带量是下降的变化动态。

表 1 田间试验各轮作期作物产量(kg/hm²)
Table 1 Crop yield of each rotation period in experimental field

年份	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1982—1984	16 224 ± 129.6e	17 790 ± 362.6d	20 297 ± 278.5b	19 395 ± 347.0c	16 692 ± 197.1e	19 485 ± 111.6c	21 138 ± 202.4a	19 809 ± 174.4bc
1985—1987	16 422 ± 123.9f	18 546 ± 141.7d	21 192 ± 94.5b	21 246 ± 149.7b	17 586 ± 104.2e	20 367 ± 144c	21 935 ± 119.2a	21 989 ± 190.6a
1988—1990	13 678 ± 202.8f	18 184 ± 217.2e	23 590 ± 247.0c	24 886 ± 227.2b	20 815 ± 347.7d	23 532 ± 255.2c	26 011 ± 267.0a	25 673 ± 288.3a
1991—1993	8 556 ± 183.1f	12 003 ± 238.5e	21 673 ± 269c	23 255 ± 347.0b	14 131 ± 244.7d	23 622 ± 276.3b	25 075 ± 249.8a	25 260 ± 252.7a
1994—1996	3 044 ± 179.4h	6 230 ± 233.6g	14 711 ± 257.7e	16 821 ± 231.8c	8 196 ± 212.0f	15 170 ± 297.3d	17 447 ± 228.5b	18 200 ± 262.7a
1997—1999	4 641 ± 223.6h	10 701 ± 182.0g	19 200 ± 231.6e	23 550 ± 225.5c	13 470 ± 300.7f	21 705 ± 239.0d	25 095 ± 203.5b	26 445 ± 284.3a
2000—2002	5 730 ± 195.9g	7 200 ± 233.5f	21 390 ± 261.2d	22 950 ± 254.7c	16 905 ± 212.2e	22 925 ± 246.3c	24 510 ± 297.1b	25 266 ± 281.7a
2003—2005	6 464 ± 224.1h	7 028 ± 245.1g	20 080 ± 158.5e	21 586 ± 218.2d	15 865 ± 247.2f	23 226 ± 222.9c	26 060 ± 302.5b	27 602 ± 290.7a
2006—2008	11 307 ± 266.1gh	10 803 ± 198.5h	42 490 ± 294.7e	43 667 ± 302.0d	25 173 ± 299.5f	44 273 ± 289.6c	47 260 ± 271.8b	48 913 ± 200.6a
1982—2008	86 066 ± 648.5h	108 486 ± 1341.2g	204 428 ± 207.2e	216 955 ± 705.6d	148 833 ± 274.1f	214 305 ± 268.7c	234 531 ± 451.5b	239 157 ± 934.2a

注: 同一行小写字母不同表示处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2.2 农田磷素养分投入产出平衡状况

在本研究中,投入项只计化肥和有机肥磷素施入量,化肥磷素按速效磷计,有机肥按全磷计。产出项只计算作物地上部携磷量。作物根茬吸收量和归还量相抵,灌水、种子带入量很小,且各处理相同,忽略不计。从小麦、玉米作物磷素投入产出平衡(表 2、表 3)值来看,磷肥养分投入量始终大于作物携带量,对化学磷肥投入量而言,1982—1990 年小麦年施磷素为 26.2 kg/hm²,1991—1995 年施磷素为 32.7 kg/hm²,1996 以后施磷素为 39.3 kg/hm²;玉米施磷量是小麦的两倍;1982—1990 年有机肥平均每年平均投入的磷素为 70.2 kg/hm²,1991—2005 年有机肥磷素投入量为 87.7 kg/hm²;在种植小麦和玉米条件下,有机肥磷素的年投入量一致。土壤磷素库收支为正平衡,平衡值因施磷量的增加而提高,因作物携带量的提高而下降。总平衡值反映出,化肥磷素长期连施总平衡值最小,小麦作物上盈余率(平衡值占携带量比率)平均为 43.3%~50.3%;玉米作物上盈余率平均 69.7%~97.0%;连施有机肥处理(M)磷素投入量大于化肥处理,总平衡值远远大于携带量,小麦作物盈余率平均 259.1%,玉米作物 114.5%;有机肥与化肥磷素配施处理(MNP、MNPK)投入量是二者分别单施之和,总

平衡值大于二者分别施用之和。小麦作物平均盈余 274.0%~277.9%,玉米作物盈余率平均为 211.3%~244.3%。从不同处理的动态变化分析,1982—1990 年这一时期化肥磷素处理(NP、NPK)投入量由于作物产量及携带量较低,平衡值远远大于携带量,但 1982—1990 年盈余率是稳步下降的趋势,盈余率由 104.1%~260.0% 下降到 94.6%~191.9%。1991—2005 年随着投入量提高,平衡值增高,盈余率由 135.4%~233.0% 增至 141.2%~237.5%。有机肥与化学磷肥长期配施处理(MNP、MNPK)同期平衡值、盈余率始终大于二者分别施用之和。变化动态反映出,前期投入量较低,由于作物产量和携带量不断提高,平衡值在较大范畴之内稳步下降。1991—2005 年这一时期,肥料投入量经过两次提高,平衡值和盈余率呈非线性增高的动态。小麦盈余率由 252.7%~261.2% 提高至 291.4%~310.4%,最高达 318.0%~330.9%;玉米盈余率由 242.0%~270.9% 逐步提高到 255.3%~308.6%。这个结果表明,有机肥与化学磷肥结合施用磷素投入量偏大,适量减少磷素投入量是比较科学的。建议充分利用有机肥资源,提高养分循环率基础上适量减少化学磷肥用量,保持土壤磷素库平衡、节约资源、减少成本,保护生态环境。

表 2 小麦磷素投入产出表(kg/hm²)
Table 2 P input-output of wheat

年份	项目	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1982—1983	携磷量	25.6	27.5	40.3	36.7	36.6	39.0	51.8	46.3
	平衡值	-25.6	-27.5	12.0	15.6	103.8	101.4	140.9	146.4
1985—1986	携磷量	23.3	25.4	44.0	42.8	36.5	40.7	53.0	54.0
	平衡值	-23.3	-25.4	8.3	9.5	103.9	99.7	139.7	138.7
1988—1989	携磷量	21.9	29.0	47.6	51.0	48.5	48.1	61.8	60.8
	平衡值	-21.9	-29.0	4.7	1.3	91.9	92.3	130.9	131.9
1991—1992	携磷量	14.1	29.0	49.2	51.8	35.5	52.7	66.7	68.3
	平衡值	-14.1	-29.0	16.2	13.6	140.0	122.8	174.2	172.6
1994—1996	携磷量	11.2	21.7	60.6	70.5	41.8	63.9	88.0	85.4
	平衡值	-11.2	-21.7	44.4	34.5	221.2	199.1	280.0	282.6
1998—1999	携磷量	10.8	13.1	39.0	43.7	30.6	42.8	60.2	63.8
	平衡值	-10.8	-13.1	39.5	34.8	144.9	132.7	193.8	190.2
2001—2002	携磷量	10.6	10.0	45.9	47.0	27.6	46.6	61.9	64.9
	平衡值	-10.6	-10.0	32.6	31.5	147.9	128.9	192.1	189.1
2004—2005	携磷量	8.7	9.3	48.1	49.3	34.9	52.0	72.4	77.5
	平衡值	-8.7	-9.3	30.4	29.2	140.6	123.5	181.6	176.5
总携量		126.2	165.0	374.7	392.8	292.0	385.8	515.8	521.0
平衡值		-126.2	-165.0	188.1	170.0	1 094.2	1 000.4	1 433.2	1 428.0

表 3 玉米磷素投入产出表(kg/hm²)
Table 3 P input-output of corn

年份	项目	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1984	携磷量	26.7	25.0	33.6	36.0	29.0	34.3	37.8	40.6
	平衡值	-26.7	-25.0	18.7	16.3	41.0	35.7	84.5	81.7
1987	携磷量	26.1	25.8	34.4	37.3	33.4	35.9	39.8	43.1
	平衡值	-26.1	-25.8	17.9	15.0	36.6	34.1	82.5	79.2
1990	携磷量	22.4	25.0	39.2	43.1	34.5	40.6	47.9	52.0
	平衡值	-22.4	-25.0	13.1	9.2	35.5	29.4	74.4	70.3
1993	携磷量	13.6	14.4	32.0	37.0	21.9	37.3	41.3	44.8
	平衡值	-13.6	-14.4	33.4	28.4	65.9	50.5	111.9	108.4
1997	携磷量	5.0	17.6	31.7	44.5	22.0	38.7	45.9	52.7
	平衡值	-5.0	-17.6	46.8	34.0	65.8	49.1	120.4	113.6
2000	携磷量	8.2	11.0	33.5	38.4	37.0	39.8	42.6	47.4
	平衡值	-8.2	-11.0	45.0	40.1	50.8	48.0	123.7	118.9
2003	携磷量	11.8	11.1	27.8	33.3	27.5	36.4	40.7	46.8
	平衡值	-11.8	-11.0	50.7	45.2	60.3	51.4	125.6	119.5
总携量		113.8	129.9	232.1	269.7	205.3	263.0	296.0	327.4
总平衡值		-113.8	-129.9	225.7	188.1	358.9	301.2	723.0	691.6

2.3 农田钾素投入产出平衡状况

钾素投入产出项只计肥料投入的速效钾和作物地上部携走量。从投入产出平衡(表 4、表 5)状况来看,河西地区农田钾素投入量始终不抵作物携走量,化学钾肥投入量 1982—1990 年小麦年施钾素 50 kg/hm², 1991—1995 年施钾素 62.5 kg/hm², 1996 年以后施钾素

75 kg/hm²; 玉米施钾量是小麦的两倍; 有机肥每年平均投入钾素 1982—1990 年 108 kg/hm², 1991—2005 年有机肥钾素为 135 kg/hm²; 有机肥小麦、玉米年投入量一致。土壤钾素长期处在负平衡状态, 亏损程度与施钾途径及投入量有密切关系。本地区一直没有施用化学钾肥的习惯, 长期以来一直依赖有机肥

表 4 小麦钾素投入产出表(kg/hm²)
Table 4 K input-output of wheat

年份	项目	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1982—1983	携钾量	154.8	203.4	294.8	311.5	304.5	298.2	401.4	389.9
	平衡值	-154.8	-203.4	-294.8	-211.5	-88.5	-182.2	-185.4	-73.9
1985—1986	携钾量	140.5	189.2	322.2	365.5	303.8	415.1	410.3	454.3
	平衡值	-140.5	-189.2	-322.2	-26.5	-87.8	-199.1	-194.3	-138.3
1988—1989	携钾量	132.0	214.2	348.5	432.5	403.1	490.6	478.7	511.6
	平衡值	-132.0	-214.2	-348.5	-332.5	-187.1	-274.6	-262.7	-195.6
1991—1992	携钾量	85.4	213.9	360.7	439.5	294.9	537.9	516.5	574.5
	平衡值	-85.4	-213.9	-360.7	-314.3	-24.9	-267.9	-246.5	-179.5
1994—1996	携钾量	67.6	160.6	462.5	598.7	348.0	653.0	681.5	775.9
	平衡值	-67.6	-160.6	-462.5	-399.5	56.0	-249.0	-277.5	-172.7
1998—1999	携钾量	65.0	96.4	285.9	370.5	254.7	437.0	466.4	536.5
	平衡值	-65.0	-96.4	-285.9	-211.1	-15.3	-167.0	-196.4	-126.5
2001—2002	携钾量	64.0	73.4	336.4	399.0	229.9	475.8	479.3	545.9
	平衡值	-64.0	-73.4	-336.4	-249.6	40.1	-205.8	-209.3	-126.5
2004—2005	携钾量	52.5	68.4	352.3	418.0	200.2	531.3	560.7	651.6
	平衡值	-52.5	-68.4	-352.3	-268.6	69.8	-261.3	-290.0	-232.2
总携量		761.8	1 219.5	2 763.3	3 333.0	2 339.1	4 038.8	3 994.8	4 440.0
总平衡值		-761.8	-1 219.5	-2 763.3	-2 260.6	-207.1	-1 906.8	-1862.8	-1239.8

表 5 玉米钾素投入产出表(kg/hm²)
Table 5 K input-output of corn

年份	项目	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
1984	携钾量	176.8	148.4	160.8	182.9	187.4	182.4	201.6	208.9
	平衡值	-176.8	-148.4	-160.8	82.9	-79.4	-74.4	-93.6	-0.9
1987	携钾量	192.9	153.0	164.2	189.7	205.4	191.1	212.1	222.0
	平衡值	-192.9	-153.0	-164.2	-89.7	-97.4	-83.1	-104.1	-14.0
1990	携钾量	147.8	148.0	187.6	218.8	183.8	216.2	255.3	267.8
	平衡值	-147.8	-148.0	-187.6	-118.8	-75.8	-108.2	-147.3	-59.8
1993	携钾量	90.0	85.5	153.1	187.5	141.5	198.3	219.9	230.8
	平衡值	-90.0	-85.5	-153.1	-63.0	-7.20	-63.6	-85.2	28.4
1997	携钾量	32.8	104.3	151.7	225.7	147.1	205.9	244.4	270.3
	平衡值	-32.8	-104.3	-151.7	-76.3	-12.4	-71.2	-109.7	13.8
2000	携钾量	54.4	65.4	160.4	194.8	226.2	211.6	227.1	244.0
	平衡值	-54.4	-65.4	-160.4	-45.4	-91.5	-76.9	-92.4	40.1
2003	携钾量	78.3	65.6	133.1	168.8	177.7	193.8	217.1	240.9
	平衡值	-78.3	-65.6	-133.1	-19.4	-43.0	-59.1	-82.4	43.2
总携量		773.0	770.2	1 110.9	1 368.2	1 269.1	1 405.3	1 577.5	1 684.7
总平衡值		-773.0	-770.2	-1 119.0	-495.0	-406.3	-542.5	-714.7	-11.2

归还土壤钾素，连施有机肥(MN、MNP)投入的钾素不抵作物携带量，呈负平衡趋势，小麦作物亏损率(平衡值占携带量比率)平均为-46.6%~-47.2%；玉米作物平均亏缺-38.6%~-45.3%。连续 24 年作物消耗土壤母质钾素(K) 2 449.3~2 577.5 kg/hm²，平均每年亏缺-102.1~-107.4 kg/hm²。本试验设计的化肥钾素投入量远远不抵消耗量，土壤钾素库负平衡，小麦作物平均亏缺-67.8%，年均消耗土壤母质钾素 133.0 kg/hm²；玉米平均亏缺率-36.2%，年均消耗土壤母质钾素 70.7 kg/hm²。有机肥与化学钾肥配合施用投入量是二者分别单施之和，钾素亏缺率迅速下降，小麦作物平均亏缺率-27.9%，玉米作物基本保持平衡。长期不施任何钾肥的土壤钾素消耗量是较大的，小麦作物平均每年消耗 162.5 kg/hm²，玉米作物平均每年消耗 158.7 kg/hm²。这要引起充分重视。虽然施有机肥能归还土壤钾素但不能平衡钾素消耗量，在有机肥基础上增施化学钾肥，形成有机肥+氮磷钾化肥的科学结构是河西地区增产培肥的有效措施^[5-7]。

2.4 磷钾肥利用率变化

磷肥利用率%=[(施磷处理携磷量-缺磷处理携磷量)/施磷量]×100%。从表观利用率(表 6)来看，试验初(1982—1983 年)化学磷肥利用率并不高，小麦作物利用率为 17.6%~24.5%；有机肥投入的磷素相当一部分为迟效性磷，利用率更低为 8.2%；有机肥与磷素化肥配施处理(MNP、MNPK)提高了投入量，利用率小于单施化学磷肥处理，平均为 9.8%~12.6%。磷肥有较长的后效，施入土壤后淋失、挥发的可能性不大，当季利用率不高，但残留在土壤中的磷素后茬

作物会逐步吸收利用，累加在一起磷利用率并不低。本试验在绿洲灌漠土上长期连施化学磷肥(NP、NPK)，小麦对磷素的总利用率达 37.3%~40.5%，有机肥磷总利用率 15.1%，与试验初相比，化学磷肥的利用率增加 12.8%~22.9%；有机肥磷素利用率增加 6.9%；有机肥与化学磷肥配合施用总利用率 18.0%~18.3%，比试验初利用率增加 5.4%~8.5%。

玉米作物对磷肥利用率小于小麦作物，总的变化趋势与小麦相同。化学磷肥连施总利用率 22.3%~30.5%。试验初利用率为 16.4%~21.0%，增加利用率 5.9%~9.5%；有机肥磷素总利用率 23.6%，比初期利用率增加 10.3%；有机肥与化学磷肥配合施用提高了用量，利用率小于二者分别单施，总利用率为 16.3%~19.4%，比试验初期利用率增加 5.8%~6.6%。

磷肥利用率的变化动态反映出，连施时间越长磷肥利用率越高，总利用率大于短期试验利用率，其中包括了历年残留磷素的后效利用率在内。证明灌漠土上磷肥有较长的后效。这个结论与国外长期定位研究有相同的趋势^[1-2]。磷肥投入量越高利用率越低，小麦、玉米作物上均表现出这一点。化肥磷素与有机肥磷素配合施用磷素利用率明显小于化肥磷素处理。这说明有机肥与磷素化肥配施磷素投入量偏高。在充分利用有机肥提高循环率的基础上，减少化学磷肥投入量是提高磷肥利用率的有效途径。

钾肥利用率%=[(施钾处理携钾量-缺钾处理携钾量)/施钾量]×100%。河西走廊土壤钾素含量较高，农业生产上长期不施化学钾肥，依靠有机肥归还土壤钾素，农田钾素一直是亏缺状态，钾肥利用率是比较高的(表 7)。

表 6 磷肥利用率(%)
Table 6 P utilization efficiency

作物	年份	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
小麦	1982—1983	—	24.5	17.6	6.5	8.2	12.6	9.8
	1985—1986	—	35.6	33.3	7.9	10.9	14.3	14.8
	1988—1989	—	35.6	42.1	13.9	13.6	17.0	17.0
	1991—1992	—	30.9	34.9	3.7	13.5	15.6	16.3
	1994—1996	—	37.0	46.5	7.6	16.0	18.0	17.3
	1998—1999	—	33.0	39.0	10.0	16.9	18.5	20.0
	2001—2002	—	45.7	47.1	10.0	20.9	20.4	21.6
	2004—2005	—	49.4	50.1	14.6	24.3	24.8	26.8
	总利用率	—	37.3	40.5	9.2	15.1	18.0	18.3
玉米	1984	—	16.4	21.0	8.6	13.3	10.5	12.8
	1987	—	16.3	22.2	10.9	14.4	11.4	14.1
	1990	—	27.1	34.6	13.6	22.3	18.7	22.1
	1993	—	26.9	22.6	8.5	26.1	17.6	19.8
	1997	—	18.0	34.3	5.0	24.0	17.0	21.1
	2000	—	28.7	34.9	29.6	32.8	19.0	21.9
	2003	—	21.3	28.3	18.7	28.8	17.8	21.5
	总利用率	—	22.3	30.5	13.4	23.6	16.3	19.4

表 7 钾肥利用率 (%)
Table 7 K utilization ratio

作物	年份	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
小麦	1982—1983	—	—	16.7	4.5	47.9	49.4	30.0
	1985—1986	—	—	41.3	—	43.0	40.8	41.8
	1988—1989	—	—	84.0	25.3	65.8	60.3	51.6
	1991—1992	—	—	62.9	—	65.6	57.7	79.2
	1994—1996	—	—	68.3	—	47.1	54.2	52.0
	1998—1999	—	—	56.6	—	56.0	66.7	59.8
	2001—2002	—	—	41.9	—	51.6	52.9	50.0
	2004—2005	—	—	44.0	—	66.3	77.2	71.4
	总利用率	—	—	53.1	—	59.8	57.8	52.3
玉米	1984	—	—	22.1	24.6	20.0	37.8	23.1
	1987	—	—	25.5	38.1	24.9	44.4	27.8
	1990	—	—	31.2	—	26.5	62.7	38.6
	1993	—	—	27.6	—	33.6	49.6	30.0
	1997	—	—	49.5	—	40.2	68.8	41.7
	2000	—	—	23.0	48.9	38.0	49.5	29.4
	2003	—	—	23.9	33.1	45.1	62.4	37.9
	总利用率	—	—	29.5	18.3	34.1	54.1	33.1

有机肥长期连施(MN、MNP)小麦对钾肥总利用率 57.8%~59.8%，玉米总利用率 34.1%~54.1%；化学钾肥长期连施(NPK)小麦、玉米作物钾肥总利用率

分别为 53.1% 和 29.5%，二者配施总利用率分别为 52.3% 和 33.1%，小麦钾利用率大于玉米。从变化动态看，钾利用率是逐步提高的趋势。一是土壤钾素长

期亏损导致土壤供钾能力降低,提高了作物对肥料钾的依赖性,如化学钾肥连施小麦、玉米对肥料利用率由试验初 16.7% 和 22.1% 逐步提高到 44.0% 和 49.5%。有机肥缺钾处理(MNP)或与化学钾肥配施(MNPK)小麦钾利用率由 30.0% ~ 49.4% 提高到 71.4% ~ 77.2%,玉米由 23.1% ~ 37.8% 增至 37.9% ~ 62.4%。二是残留的钾肥养分也有一定的后效,如化学钾肥处理小麦、玉米总利用率比试验初分别增加 36.4% 和 7.4%;有机肥单施或与化肥配施小麦总利用率比试验初提高 8.4% ~ 22.3%,玉米提高 10.0% ~ 16.3%。这充分表明土壤钾长期亏缺和钾素肥料后效导致钾肥利用率不断增加是必然的^[8-12]。

3 讨论

养分平衡结果是土壤养分库的输入与输出的差额,输入量等于甚至大于输出量才能维持农田养分平衡。连续 24 年来,随着作物产量的提高,磷钾养分产出量呈现逐步增加的趋势,随着相应肥料投入量不断提高,使投入产出向平衡的方向发展。农田磷素养分投入量始终大于作物携带量,投入产出表现为正平衡。化学磷肥长期连施(NP、NPK)情况下,平均盈余 43.3% ~ 97.0%,1982—1990 年这一时期平衡值较低,且是下降的变化动态,1991—2005 年投入量较大,化学磷肥投入量较高,有一部分磷素养分残留于土壤,补充土壤磷库。有机肥与化学磷肥配施平衡值远远大于化学磷肥处理,平衡值是携带量的数倍,盈余率平均达 211.3% ~ 277.9%。变化动态反映出,后期(1991—2005 年)盈余率远远高于前期,平均达 255.3% ~ 310.3%。有机肥与化学肥料配施是生产上推广的长期施肥措施,磷素盈余率偏高的现实表明磷肥投入量偏大。磷肥基本上无挥发和淋失损失,且有较强的后效,因此,充分利用有机肥,适量减少化学磷肥投入量无疑是科学施磷之举。钾肥投入量始终小于作物携带量,农田钾素投入产出为负平衡。河西地区不施化学钾肥,长期依靠有机肥归还土壤钾素。连施有机肥(MN、MNP)农田钾素平均亏缺 -38.6% ~ -47.2%;连施化学钾肥(NPK)平均亏缺 -36.2% ~ -67.8%;二者配施(MNPK)能减少钾素亏缺率,玉米作物相对平衡,小麦作物平均亏缺 -27.9%。说明在传统的有机肥基础上增施化学钾肥是减少土壤钾素亏缺的必须措施^[13]。

短期试验表明,磷肥利用率较低,长期试验获得的利用率远远大于短期试验,连续施用化学磷肥小麦作物上磷肥利用率平均为 37.3% ~ 40.5%,玉米作

物为 22.3% ~ 30.5%;有机肥与化学磷肥长期配施,小麦磷素利用率 18.0% ~ 18.3%,玉米作物 16.3% ~ 19.4%。磷素有较长的后效,化学磷肥在小麦作物上总利用率比短期提高 12.8% ~ 22.9%,玉米作物上提高 5.9% ~ 9.5%;有机肥与化学磷肥分别施用两种作物上增加利用率分别为 5.4% ~ 8.5% 和 5.8% ~ 6.6%。减少磷肥用量是提高利用率的有效途径。土壤钾素长期亏损,钾肥利用率相对较高,小麦作物对有机肥钾素利用率为 57.8% ~ 59.8%,化学钾利用率为 53.1%;玉米作物对有机肥和化肥钾素利用率分别为 34.1% ~ 54.1% 和 29.5%。钾素肥料总利用率比试验初提高 7.4% ~ 36.4%。

4 结论

在长期施肥条件下,不同施肥处理间的作物产量具有明显的差异性。有机肥与化肥配合施用的产量大于化肥处理,而且产量处于最高水平;化肥养分平衡配施条件(NPK),作物产量较高,而且相对稳定。施磷肥比无磷处理显著地提高产量,施钾也有较明显的增产趋势。有机肥、氮素化肥长期单施产量水平较低,作物产量呈现下降的趋势。

作物对磷钾养分携带量表现出与作物产量基本一致的趋势。施磷素化肥处理比无磷处理携带量平均增加 79.8% ~ 137.6%,有机肥与磷配施携带量比磷素化肥处理平均增加 21.6% ~ 37.9%,比有机肥处理增加 12.6% ~ 35.3%。施钾素化肥处理携钾量平均增加 20.6% ~ 23.2%;有机肥与钾化肥配施处理比有机肥、钾素化肥处理分别平均增加携钾量 6.9% ~ 11.3% 和 23.1% ~ 33.3%。

在施用磷肥及有机肥的各个施肥处理下,磷素养分投入量始终大于作物携带量,在种植小麦和玉米条件下,有机肥磷素的年投入量一致。土壤磷素库收支为正平衡,平衡值因施磷量的增加而提高,因作物携带量的提高而下降。总平衡值反映出,化肥磷素长期连施总平衡值最小。在各施肥处理下,土壤钾素长期处在负平衡状态,亏损程度与施钾途径及投入量有密切关系。

长期连施化学磷肥处理(NP、NPK),小麦对磷素的总利用率达 37.3% ~ 40.5%,有机肥磷总利用率 15.1%;玉米作物对磷肥利用率小于小麦作物,总的变化趋势与小麦相同,化学磷肥连施总利用率 22.3% ~ 30.5%,有机肥磷素总利用率 23.6%,有机肥与化学磷肥配合施用提高了用量,利用率小于二者分别单施,总利用率为 16.3% ~ 19.4%。有机肥长期连施处

理(MN、MNP)小麦对钾肥总利用率 57.8%~59.8%，玉米总利用率 34.1%~54.1%；化学钾肥长期连施处理(NPK)小麦和玉米作物钾肥总利用率分别 53.1%和 29.5%，二者配施总利用率分别为 52.3%和 33.1%。小麦对钾肥利用率大于玉米的利用率。

参考文献：

- [1] 鲁如坤主编. 土壤—植物营养学原理和施肥[M]. 北京：化学工业出版社, 1998
- [2] 沈善敏主编. 中国土壤肥力[M]. 北京：中国农业出版社, 1998
- [3] 黄绍文, 金继运, 左余宝, 杨俐苹, 程明芳. 农田养分平衡状况及其评价的试点研究[J]. 土壤肥料, 2002(6): 14-19
- [4] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995(1): 1-9
- [5] 索东让, 王平. 河西走廊灌漠土主要粮食作物钾吸收效率及钾素平衡定位研究[J]. 干旱地区农业研究, 2001(4): 6-10
- [6] 高祥照, 马文奇, 崔勇, 王蓉芳, 张福锁. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2000(4): 364-369
- [7] 谢建昌, 周健民著. 钾与中国农业[M]. 南京：河海大学出版社, 2000: 142-184
- [8] 张慧, 高如泰, 夏训峰, 贾小红, 刘树庆, 许其功, 姜甜甜. 北京市房山区农田表观磷平衡分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1 949-1 955
- [9] 马旭, 田长彦, 冯固, 向祥盛, 张惠文, 郭杰, 吐尔逊娜依. 新疆棉田化肥资源施用与产出效率特征[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 375-379
- [10] 宋永林, 姚选华, 袁锋明. 不同肥料配施土壤主要养分含量及作物对氮磷钾素表观利用率影响[J]. 土壤肥料, 2002(3): 23-25
- [11] 中国农科院土肥所主编. 中国肥料[M]. 上海：上海科学技术出版社, 1999
- [12] 沈善敏. 国外的长期定位试验(二)[J]. 土壤通报, 1984(3): 134-138
- [13] 中国农科院农业自然资源和区划研究所. 中国耕地[M]. 北京：中国农业科技出版社, 1995: 95-118

Budgets of Phosphorous and Potassium as well as Fertilizer Use Efficiency in Farmland of Hexi Corridor Based on Long-term Field Experiment

SUN Ning-ke¹, LI Long^{2*}, SUO Dong-rang¹, WANG Qian²

(1 Zhangye Academy of Agricultural Sciences of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China; 2 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The study on input-output budget and fertilizer use efficiency of P and K nutrients was conducted in a 24-year long-term field located in Hexi Corridor by the nutrient difference method. The results showed that P nutrient input was always greater than output, which was the positive budget. The average surplus rate of chemical P fertilizers continuously applied as NP and NPK was from 43.3% to 97.0%. The total P average utilization rate of wheat and corn was 37.3%—40.5% and 22.3%—30.5%, respectively, the short-term P use efficiency increased by 12.8%—22.9% and 5.9%—9.5%. The average surplus rate of combining application of organic manure and chemical fertilizers (MNP, MNPK) was 211.3%—277.9%. The total P use efficiency of wheat and maize was 18.0%—18.3% and 16.3%—19.4% respectively, which increased by 5.4%—8.5% and 5.8%—6.6% higher than the initial test. The measures of continuous organic fertilizer application and moderate reduction chemical fertilizers were rational balanced fertilization method. The input of K was always lower than the output of crop uptake, it was the negative balance of K. Long-term application of organic fertilizers (MN、MNP) could not balance soil K, the average deficit was -38.6%—-47.2%. The total use of K in manure and the fertilizer rate of wheat and corn crops were 57.8%—59.8% and 34.1%—54.1% respectively, compared with initial trials which increased 8.4%—22.3%. K fertilizer average deficit was -36.2%—-67.8% by continuous chemical K application. K fertilizer use efficiency of wheat and maize was 53.1% and 29.5% respectively, which increased by 7.4%—36.4% than initial trials. It was the necessary measures to increase chemical fertilizers application on the basis of organic manure.

Key words: P and K nutrients, Surplus rate, Deficiency rate, Fertilizer use efficiency