

曹雅琪,王寅,朱琳,等.土壤-作物系统综合管理对春玉米产量及磷、钾养分利用的长期影响[J].华中农业大学学报,2022,41(2):88-97.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.011

土壤-作物系统综合管理对春玉米产量及磷、钾养分利用的长期影响

曹雅琪,王寅,朱琳,李玉玺,郑春雨,陈安吉,冯国忠,高强

吉林农业大学资源与环境学院/秸秆综合利用与黑土地保护教育部重点实验室/
吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,长春 130118

摘要 为评估土壤-作物系统综合管理(ISSM)的应用效果并为区域作物可持续高产高效提供技术支撑,基于2009—2020年开展的春玉米长期定位试验,探讨不施肥(CK)、农民习惯(FP)、高产管理(HY)和ISSM 4种管理方式对玉米产量、植株磷钾养分吸收量、利用效率及土壤磷钾养分状况的长期影响。结果显示,12年间CK处理玉米产量大幅下降,FP处理产量略有下降,而HY和ISSM处理产量呈上升趋势。ISSM处理的年均产量、磷钾养分吸收量分别较FP处理显著增加26%、24%和32%,达到了HY处理的98%、91%和85%。ISSM处理的平均磷、钾肥利用率分别较FP处理增加18.7和1.2个百分点,较HY处理增加17.4和24.8个百分点。采用ISSM方式12 a后较FP处理显著提高0~20和20~40 cm土层的全量磷、钾和速效磷、钾含量及0~20 cm土层各粒级团聚体中的速效磷、钾含量。相关性分析发现各指标间均呈正相关关系,其中产量与植株磷、钾吸收利用指标间,土壤磷、钾养分与>0.25 mm粒级团聚体磷、钾养分指标间的相关性较强。结果表明,ISSM方式可实现春玉米的长期高产稳产,增加磷钾养分吸收利用,提高土壤磷钾养分供应能力,促进土壤-作物系统可持续发展。

关键词 土壤-作物系统综合管理;玉米;产量;磷;钾;高产高效;土壤肥力;绿色可持续发展

中图分类号 S147.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0088-10

磷、钾能够促进植物生长发育,对于提高作物产量及品质发挥着至关重要的作用^[1]。我国磷矿资源总体丰富,但矿石开采和磷肥生产成本较高^[2];而我国钾肥自给率仅保持在50%左右,每年仍需进口大量钾肥^[3]。另外,我国大多农户在作物生产中对磷、钾肥的关注相对较少,不合理施肥不仅影响作物产量和品质,还会造成资源浪费和环境污染问题^[4]。因此,我国农业生产应充分重视磷、钾养分管理,在保证粮食安全、营养均衡的同时提高磷、钾资源的高效利用。

土壤-作物系统综合管理(ISSM)方式于2011年提出,是基于作物生态生理模型和多年的区域土壤气候条件重新设计作物种植体系,包括作物品种、种植密度及时期、施肥及耕作方法等一系列田间管理措施,以最大限度地利用光、热、水等自然资源,提升土壤肥力,从而实现作物的高产稳产和资源高效^[5-6]。

ISSM方式被认为是一种能够维持土壤-作物系统可持续性和促进农业可持续发展的有效途径^[7-8]。Chen等^[9]基于2009—2012年在我国11个省份进行的153项田间试验发现,相比于农民习惯(FP),ISSM方式实现了玉米、水稻和小麦三大粮食作物增产21%~87%,氮素利用率提高24%~32%,氮素损失和温室气体排放量分别降低50%~56%和31%~47%。另外,基于22个省5 147个试验点的研究显示,ISSM方式相比FP措施平均减少24%的氮肥投入,而产量和氮素利用率分别提高12%和40%,有效实现了农业生产的高效可持续^[10]。2013—2016年在山东省开展冬小麦-夏玉米轮作试验结果表明,ISSM方式下冬小麦和夏玉米平均产量分别提高31%和33%,氮素损失则分别降低39%和54%,能够有效地促进土壤-作物系统的氮素平衡,提高环境效益^[11]。基于在吉林省开展的玉米定位试验发现,ISSM方式

收稿日期:2021-11-25

基金项目:吉林省自然科学基金面上项目(20190201117JC);国家重点研发计划项目(2016YFD0200101)

曹雅琪,E-mail:18843179660@163.com

通信作者:王寅,E-mail:wy1986410@163.com

相比FP措施降低了86%的氮素盈余,分别减少氮素损失和温室气体排放量20%和13%,显著提高了氮肥利用效率^[12]。目前,ISSM管理相关研究大多关注于作物的产量、氮素吸收利用及其环境影响,而对于磷、钾养分的关注较少,更缺少相关的长期效应研究。

本研究基于吉林省玉米ISSM定位试验,分析2009—2020年间ISSM方式下春玉米籽粒产量、植株干质量及磷、钾养分吸收和土壤及不同粒级团聚体中磷、钾养分含量的变化,阐明ISSM方式对春玉米产量及磷、钾养分利用的长期影响,旨在为区域作物磷、钾养分优化管理和高产高效可持续生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2009年在吉林省梨树县(43°20′16″N, 124°03′36″E)开展,该地区属于温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为5.8℃,年平均降雨量为570 mm。

该试验地土壤类型为冲积土,0~20 cm土层土壤基础理化性质如下:pH 5.15,有机碳7.08 g/kg,全氮1.04 g/kg,碱解氮92.0 mg/kg,速效磷29.1 mg/kg,速效钾52.0 mg/kg,粗砂16.0 g/kg,细砂460.8 g/kg,粉砂295.8 g/kg和黏粒227.4 g/kg。

1.2 试验设计与田间管理

田间试验共设计4个处理:(1)对照(CK),不施肥处理;(2)农民习惯(FP),通过在该区域进行大范围农户问卷调研方式,以确定当地农民主流的玉米田间管理方式;(3)高产栽培(HY),不考虑资源和成本投入,基于最高的种植密度结合最大的养分投入和多次施肥,以最大化提高玉米产量为目标的管理方式;(4)土壤-作物系统综合管理(ISSM),根据区域气候条件和土壤状况,重新设计作物生产体系和管理方法,通过合理密植结合适量的养分供应和相对简化的施肥运筹,以实现提升土壤肥力、提高作物产量和资源利用效率的管理方式。

4个处理的田间管理模式在多方面存在差异,包括种植密度、耕作方式、养分投入量和来源、肥料施用运筹等,具体管理措施见表1。

试验小区面积为120 m²(20 m×6 m),采用随机区组设计,设4次重复,供试玉米品种为良玉99。试验开展期间于4月下旬至5月上旬播种,9月下旬至10月初收获。

试验采用的肥料品种为尿素(46% N)、磷酸二铵(46% P₂O₅)和硫酸钾(50% K₂O),有机肥种类为猪粪,1 kg平均含N 5.2 g、P₂O₅ 4.3 g、K₂O 4.7 g。玉米生育期内,各试验处理均按照当地最佳管理方式进行除草和病虫害防治,未进行田间灌溉。

1.3 植株样品采集与测定

每年玉米收获期,选取小区中心65 m²区域进行测产,并在每个小区选取10株长势均匀的植株,采集地上部样品于70℃下烘干后称质量并研磨。样品采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后,分别采用钒钼黄比色法和火焰光度计法测定磷、钾养分含量。

1.4 土壤样品采集与测定

2020年玉米收获后,每个小区选取10个样点,分别采集0~20和20~40 cm土层的土样,混匀,自然风干后研磨,再分别过孔径0.85、0.15 mm筛,测定土壤速效磷、速效钾和全磷、全钾含量。速效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用NH₄OAc浸提-火焰光度法;全磷采用HClO₄-H₂SO₄消煮法,全钾采用NaOH熔融-火焰光度法。

另外,在每个小区采集0~20 cm和20~40 cm土层各10个原状土样,混匀后装入塑料盒内带回,将大土块沿自然破碎面掰开过孔径8 mm筛,完全风干后分别采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成^[13]。湿筛后得到的各粒级团聚体样品于70℃下烘干并称质量,研磨过孔径0.85 mm筛后测定速效磷和速效钾含量。

1.5 指标计算

植株磷素吸收量=∑(植株不同部位干质量×植株不同部位磷含量)。

植株钾素吸收量计算同磷素。

磷肥回收利用率=(施肥处理植株磷累积量-不施肥处理植株磷累积量)×100/(磷肥施用量×磷肥养分含量)^[14]。

钾肥回收利用率计算同磷肥。

SI=(mean-SD)/max。SI用来评估多年来玉米籽粒产量和其他指标的可持续性^[12];mean为平均值,SD为标准差,max为所有试验年份中的最大参数值。

CV=SD/mean×100%。CV为变异系数,反映13年间各指标的变异程度,SD为标准差,mean为平均值。

1.6 统计分析

采用Microsoft Excel进行数据整理和计算,Ori-

表1 不同试验处理玉米生产的田间管理方式

管理内容 Management item		对照 CK	农民习惯 FP	高产栽培 HY	土壤-作物系统综合管理 ISSM
耕作方式 Tillage method		春季播种前旋耕至 15 cm Rotary tillage to 15 cm before sow- ing in spring	春季播种前旋耕至 15 cm Rotary tillage to 15 cm before sowing in spring	秋季收获后深松 25 cm, 春季播 种前旋耕至 15 cm Subsoil tillage to 25 cm after har- vest in autumn and rotary tillage to 15 cm before sowing in spring	秋季收获后深松 25 cm, 春季播种 前旋耕至 15 cm Subsoil tillage to 25 cm after harvest in autumn and rotary tillage to 15 cm before sowing in spring
种植密度/ (plants/hm ²) Planting density		55 000	55 000	80 000	70 000
化肥施用量/ (kg/hm ²) Chemical fer- tilizer amount	N P ₂ O ₅ K ₂ O	0 0 0	225 100 60	300 120 150	200 67 67
有机肥用量/ (kg/hm ²) Organic fertilizer amount		0	0	30 000	25 000
总养分投入/ (kg/hm ²) Total nutrient input	N P ₂ O ₅ K ₂ O	0 0 0	225 100 60	355 165 199	241 101 104
施肥运筹 Fertilizer operations			基施 50% N、100% P ₂ O ₅ 和 K ₂ O; 拔节期追施 50% N 50% of N, 100% of P ₂ O ₅ and K ₂ O applied as basal fer- tilizer; and 50% of N ap- plied as topdressing at the jointing stage	基施 35% N、65% P ₂ O ₅ 和 K ₂ O, 播 期施 10% N, 15% P ₂ O ₅ 和 K ₂ O, 拔节期和吐丝期分别追施 35% N 和 20% N, P ₂ O ₅ , K ₂ O 35% of N, 65% of P ₂ O ₅ and K ₂ O applied as basal fertilizer; 10% of N and 15% of P ₂ O ₅ and K ₂ O as starter fertilizer applied with the seed at sowing, 35% of N applied as topdressing at the jointing stage; and 20% of N, P ₂ O ₅ and K ₂ O applied as top- dressing at the silking stage	基施 40% N、80% K ₂ O 和 100% P ₂ O ₅ , 播期和拔节期分别追施 10% N 和 50% N、20% K ₂ O 40% of N, 80% of K ₂ O and 100% of P ₂ O ₅ applied as basal fertilizer; 10% of N as starter fertilizer applied with the seed at sowing; and 50% of N and 20% of K ₂ O applied as top- dressing at the jointing stage

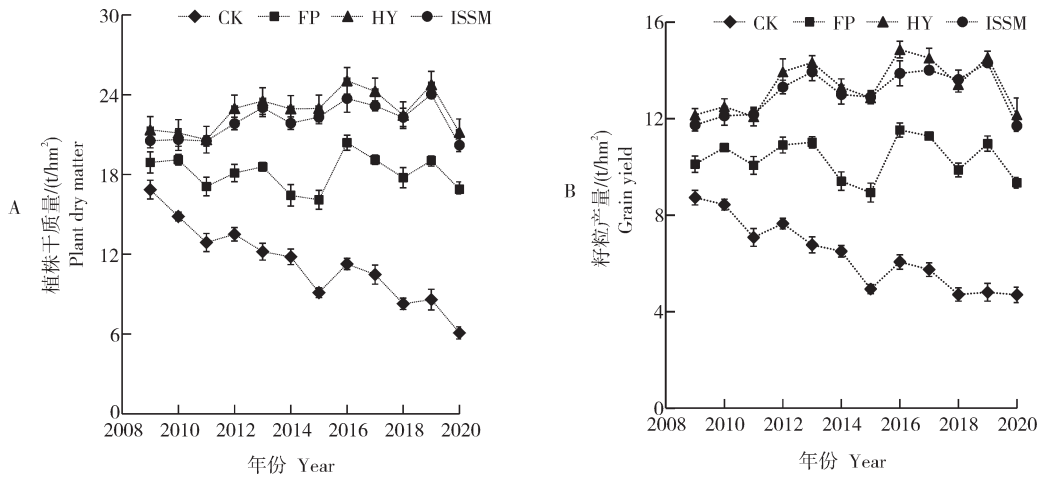
gin 2018 软件进行绘图, SPSS 18.0 软件进行单因素方差统计分析, 采用最小显著性差异法 (LSD) 确定在 $\alpha=0.05$ 水平下各处理间差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 春玉米植株干质量和籽粒产量

2009—2020 年间各处理春玉米植株干质量和籽粒产量的变化趋势存在明显差异 (图 1)。CK 处理的植株干质量和产量均呈大幅下降趋势, FP 处理整体略有下降, HY 和 ISSM 处理总体为上升趋势。植株干质量和籽粒产量的变异系数均以 CK 处理明显高于其他 3 个

施肥处理, 而施肥处理之间差异较小, 其中 ISSM 处理相对较低 (表 2)。ISSM 处理植株干质量和籽粒产量的多年稳定性分别为 0.86 和 0.85, 略高于 HY 处理 (0.85 和 0.83), 但显著高于 FP 处理 (0.83 和 0.82)。总体来看, 各处理组的年平均植株干质量和产量排序为 $HY \approx ISSM > FP > CK$ 。其中, ISSM 处理的年平均植株干质量和籽粒产量分别达到 HY 处理的 96% 和 98%, 相比 FP 处理分别增加 22% 和 26%。HY 和 ISSM 处理均显著提高了玉米的植株干质量和籽粒产量, 而 ISSM 处理在获得玉米高产方面具有较好的可持续性和稳定性, 能够促进玉米的持续高产稳产。



CK:不施肥;FP:农民习惯;HY:高产管理;ISSM:土壤-作物系统综合管理。下同。CK:No fertilization;FP:Farmers' practices;HY:High yield management;ISSM:Integrated soil-crop system management.The same as below.

图1 2009—2020年不同处理春玉米植株干质量(A)和籽粒产量(B)的变化趋势

Fig.1 Change trends of plant dry matter (A) and grain yield (B) of spring maize in different treatments from 2009 to 2020

2.2 春玉米植株磷、钾素吸收与利用

不同处理春玉米植株磷、钾养分吸收量的年际间变化趋势存在明显差异,整体趋势与籽粒产量、植株干质量相似(图2)。植株磷、钾吸收量的变异系数均以CK处理明显高于其他3个施肥处理,磷吸收量的变异系数在施肥处理间差异较小,其中ISSM处理相对较高;钾吸收量的变异系数以FP处理较高,ISSM处理较低(表2)。3个施肥处理植株磷吸收量的稳定性在0.79~0.82,且无显著性差异,而植株钾

吸收量的稳定性以ISSM和HY处理显著高于FP处理。综合所有试验年份来看,各处理植株磷、钾吸收量的排序均为HY>ISSM>FP>CK。ISSM处理的平均植株磷、钾吸收量分别达到HY处理的91%和85%,而相比FP处理则分别增加24%和32%。ISSM处理相比HY处理减少了养分投入,对于植株磷、钾养分的吸收也具有促进作用,能够显著提高植株磷、钾养分吸收量。

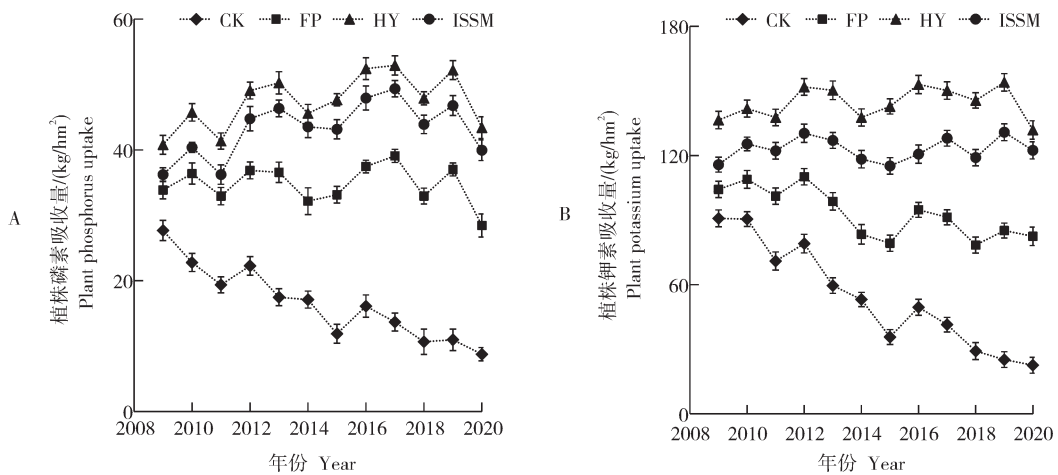


图2 2009—2020年不同处理春玉米植株磷(A)、钾(B)吸收量的变化趋势

Fig.2 Change trends of plant phosphorus (A) and potassium (B) uptake of spring maize in different treatments from 2009 to 2020

3个施肥处理的磷、钾肥回收利用率在12年间整体均呈上升趋势(图3)。其中,ISSM处理的磷肥回收利用率在各年份均高于HY和FP处理,钾肥回收利用率在各年份均高于HY处理,与FP处理差异较

小。HY处理的磷肥回收利用率在各试验期内较FP处理相比无显著差异,而钾肥回收利用率均低于FP处理。ISSM处理磷、钾肥回收利用率的变异系数均高于HY处理,与FP处理间差异较小(表2)。ISSM

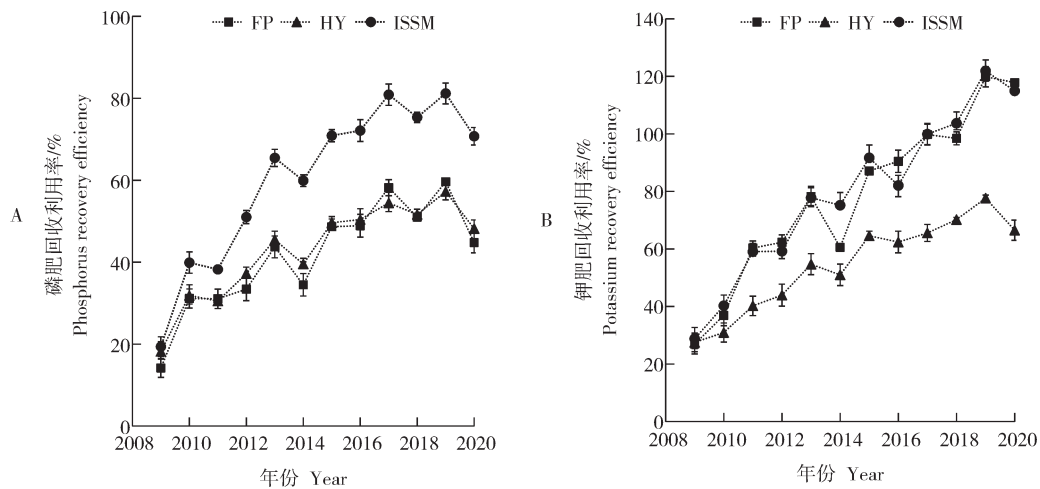


图3 2009—2020年不同处理春玉米磷(A)、钾肥(B)回收利用率的变化趋势

Fig.3 Change trends of phosphorus (A) and potassium (B) recovery efficiency of spring maize in different treatments from 2009 to 2020

表2 2009—2020年不同处理春玉米的平均籽粒产量、植株干质量、磷素和钾素的吸收量及其肥料利用率

Table 2 The mean grain yield, plant dry matter, plant phosphorus and potassium uptake, phosphorus and potassium recovery efficiency of spring maize in different treatments from 2009 to 2020

项目 Item	处理 Treatment	植株干质量/ (t/hm ²) Plant dry matter	籽粒产量/ (t/hm ²) Grain yield	植株磷素 吸收量/ (kg/hm ²) Plant phosphorus uptake	植株钾素 吸收量/ (kg/hm ²) Plant potassium uptake	磷肥回收 利用率/% Fertilizer phosphorus recovery efficiency	钾肥回收 利用率/% Fertilizer potassium recovery efficiency
平均值±标准差 Mean±SD	CK	11.3±3.0c	6.2±1.6c	16.6±5.7d	54.0±24.5d	—	—
	FP	18.1±1.3b	10.4±0.8b	34.7±3.0c	93.1±11.5c	41.5±13.1c	78.2±29.7b
	HY	22.8±1.5a	13.4±1.0a	47.5±4.2a	144.5±7.3a	42.8±11.6b	54.6±16.0c
	ISSM	22.0±1.3a	13.1±0.9a	43.2±4.3b	122.9±5.4b	60.2±19.4a	79.4±28.9a
稳定性 SI	CK	0.49c	0.53c	0.39b	0.32c	—	—
	FP	0.83b	0.82b	0.81a	0.74b	0.46c	0.41b
	HY	0.85a	0.83ab	0.82a	0.89a	0.55a	0.50a
	ISSM	0.86a	0.85a	0.79a	0.90a	0.51b	0.42b
变异系数/% CV	CK	26.75	26.06	34.58	45.33	—	—
	FP	7.15	8.17	8.62	12.38	31.57	37.97
	HY	6.49	7.72	8.79	5.06	27.04	29.30
	ISSM	5.99	7.15	9.91	4.39	32.17	36.35

注:不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平存在显著性差异。下同。Note: Different letter means significantly different at $\alpha=0.05$ probability level. The same as below.

处理的磷、钾肥回收利用率稳定性分别能够达到HY处理的93%和84%,较FP处理相比,磷肥回收利用率稳定性显著增加,钾肥回收利用率稳定性略高。多年平均来看,各处理磷肥回收利用率高低顺序为ISSM>HY>FP,钾肥回收利用率高低顺序为ISSM>FP>HY。ISSM处理平均磷、钾肥回收利用率分别较HY处理增加17.4和24.8个百分点,较FP处理增加18.7和1.2个百分点。ISSM处理能够促进春玉米对磷、钾养分的高效利用,并且显著提高磷、

钾肥回收利用率。

2.3 土壤磷、钾养分含量

总体上,0~20 cm土层的全磷、全钾、速效磷和速效钾含量高于20~40 cm土层(表3)。不同处理显著影响了2个土层的各项指标,其高低趋势一致,均为HY>ISSM>FP>CK。0~20 cm土层中,ISSM处理的土壤全磷、全钾、速效磷和速效钾含量分别达到HY处理的89%、95%、87%和84%,其中全钾含量两者无差异;而20~40 cm土层中,ISSM处理的各

项指标分别为HY处理的86%、96%、97%和84%，除速效钾含量外，其余指标两者均无显著差异。ISSM处理的全磷、全钾、速效磷和速效钾含量在2个土层均显著高于FP处理，0~20 cm土层的增幅分别为33%、12%、63%和66%，而20~40 cm土层的增

幅分别为20%、8%、81%和25%。HY和ISSM处理均能够显著增加土壤中磷、钾养分含量，ISSM处理各方面的田间管理措施更为合理，其对于土壤磷、钾养分的储存能力以及土壤肥力的改善效果更强。

表3 0~20 cm和20~40 cm土层不同处理土壤的全磷、全钾、速效磷和速效钾含量
Table 3 Soil total and available contents of phosphorus and potassium in 0-20 cm and 20-40 cm soil layers in different treatments

处理 Treatment	0~20 cm				20~40 cm			
	全磷/ (g/kg) Total Phosphorus	全钾/ (g/kg) Total Potassium	速效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium	全磷/ (g/kg) Total phosphorus	全钾/ (g/kg) Total potassium	速效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium
CK	0.56c	5.0c	48.2c	43.6d	0.41c	5.0b	23.7b	42.1d
FP	0.61c	5.2b	56.2c	60.6c	0.49b	5.1b	30.6b	50.6c
HY	0.91a	6.1a	105.7a	120.1a	0.67a	5.7a	57.2a	75.4a
ISSM	0.78b	5.8a	91.6b	100.7b	0.64a	5.5a	55.3a	63.4b

通过对土壤团聚体进行分级,发现各粒级团聚体中的速效磷、钾含量也受到不同处理的显著影响(图4、5)。0~20 cm土层各粒级土壤团聚体的速效磷、速效钾含量均明显高于20~40 cm土层。0~20 cm土层中,各处理的团聚体速效磷含量随粒级的减小均呈先增加后降低趋势,在2~0.5 mm粒级含量达到最高,而20~40 cm土层各粒级团聚体的速效磷含量差异相对较小。对于速效钾含量,0~20 cm和20~40 cm土层均呈现随粒级减小而逐渐下降的趋势。

各处理中,HY和ISSM处理2个土层各粒级团聚体的速效磷含量均显著高于FP和CK处理,而两者之间仅在0~20 cm土层的>2 mm和2~0.5 mm粒级下存在显著差异(图4)。总体上,0~20 cm土层ISSM处理的团聚体速效磷含量在各粒级下可达到HY处理的53%~95%,而相比FP处理的增幅在86%~97%。20~40 cm土层中,ISSM处理的团聚体速效磷含量在各粒级下可达到HY处理的90%~99%,而相比FP处理的增幅在66%~144%。

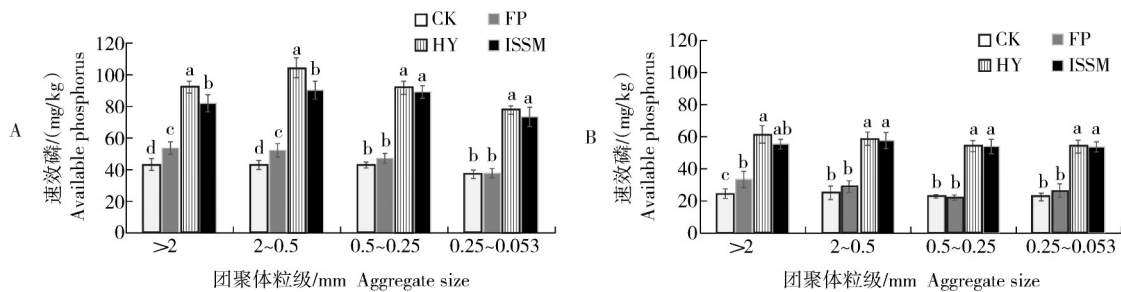


图4 0~20 cm(A)和20~40 cm(B)土层土壤团聚体各粒级的速效磷含量

Fig.4 Available phosphorus content of all aggregate size fractions in 0-20 cm (A) and 20-40 cm (B) soil layers

各处理中,HY和ISSM处理在0~20 cm土层的各粒级和20~40 cm土层的>2 mm、0.5~0.25 mm粒级中团聚体的速效钾含量均显著高于FP和CK处理,且各处理间差异均达显著水平(图5)。总体上,0~20 cm土层ISSM处理的团聚体速效钾含量在各粒级下可达到HY处理的82%~90%,而相比FP处理的增幅在81%~87%。20~40 cm土层中,ISSM处理的团聚体速效钾含量在各粒级下可达到HY处

理的83%~88%,而相比FP处理,其增幅在14%~28%。HY和ISSM处理能够促进土壤团聚体各粒级中磷、钾养分含量的累积,ISSM处理结合了适宜的耕作和施肥方式,能够更有效地增强土壤团聚体保肥供肥能力,提升土壤肥力水平。

2.4 各项指标间的相关性分析

对本研究的各项指标进行相关分析发现,各项指标之间均存在正相关关系(图6)。其中,玉米籽粒

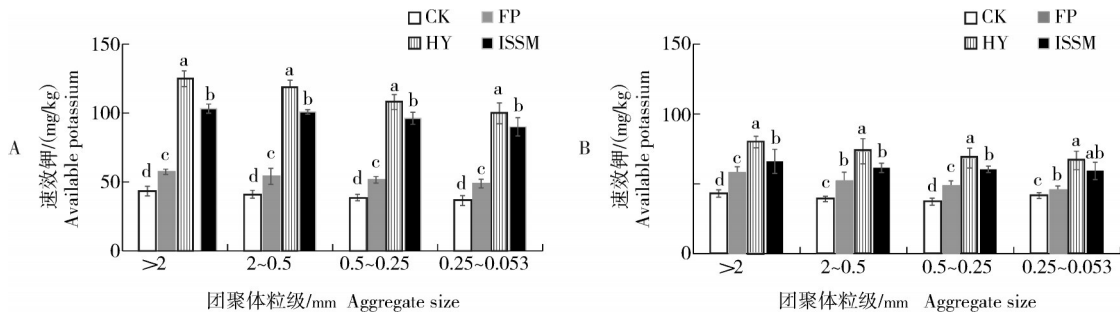
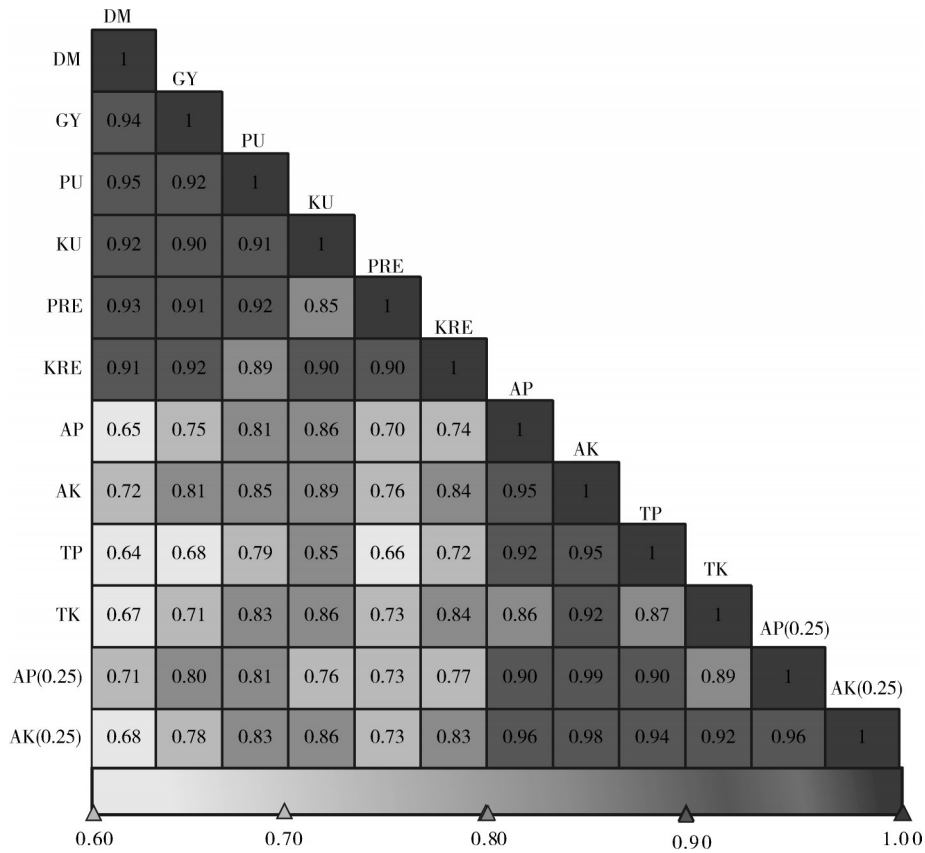


图5 0~20 cm(A)和20~40 cm(B)土层土壤团聚体各粒级的速效钾含量

Fig.5 Available potassium content of all aggregate size fractions in 0-20 cm (A) and 20-40 cm (B) soil layers



DM:干质量; GY:产量; PU,KU:植株磷、钾素吸收量; PRE、KRE:磷、钾肥回收利用率; AP、AK:速效磷、速效钾; TP、TK:全磷、全钾; AP(0.25),AK(0.25):土壤>0.25 mm 粒级团聚体中的速效磷、速效钾。DM:Dry matter; GY:Grain yield; PU,KU:Plant phosphorus, potassium uptake; PRE, KRE:Phosphorus, potassium recovery efficiency; AP, AK: Available phosphorus, available potassium; TP, TK: Total phosphorus, total potassium; AP(0.25), AK(0.25): Available phosphorus, available potassium in >0.25 mm aggregate size fractions.

图6 各项指标间的相关性

Fig.6 Correlation analysis diagram of various indicators

产量与植株干质量、磷钾养分吸收利用各指标之间,以及土壤磷钾养分含量与>0.25 mm 粒级团聚体磷钾养分含量各指标之间的相关性较强,相关系数均超过0.9。而植株干质量与土壤速效磷、全磷、全钾、>0.25 mm 粒级团聚体中速效钾的相关性较弱,相关系数低于0.7。另外,土壤全磷与作物籽粒产量、磷肥回收利用率之间的相关性也相对较弱,分别为0.68和0.66。

3 讨论

本研究发现, HY 和 ISSM 方式在 12 年间始终保持较高的成熟期植株干质量,从而实现了稳定的高产,其年均产量分别达到 13.4、13.1 t/hm², 相比 FP 分别增加了 29% 和 26%。分析其高产的原因,首先是 HY 和 ISSM 方式提高了玉米的种植密度,增加了群体数量,为单位面积上植株干质量的增加提供了基

础^[15]。同时,2个处理与FP处理相比在秋季收获均增加了深松环节,有利于打破犁底层,降低下层土壤容重^[16-17],一方面可以增加冬季降雪后水分的渗入,保证较高的春季土壤水分而促进玉米出苗和苗期生长;另一方面,疏松透气的下层土壤有利于根系的下扎,为植株生长发育提供更好的水分和养分供应^[18]。施肥方式上,HY和ISSM处理通过采用有机-无机配施、增加追肥等措施,改善了土壤物理结构和生物化学活性,增加了土壤养分供应能力和有效性,充分满足了生育期内植株的养分需求,从而促进了植株发育,提高光合作用而增加了干物质累积^[19]。另外,HY和ISSM处理充足的磷钾养分供应也提高了玉米植株的磷、钾养分浓度,从而增加了植株的磷、钾养分吸收量,2个处理的年平均植株磷、钾吸收量相比FP处理显著增加。本研究中,HY处理通过最大化群体密度,同时辅以充足的养分供应,目的在于实现最大的产量效益。ISSM处理在HY基础上,首先适度降低了植株密度,促进了植株个体的发育和结实,从而实现了群体结构的优化;同时,通过降低肥料用量结合调整追肥的时期和比例,实现了氮磷钾养分的平衡适时供应,更好地匹配了植株在关键生育期的养分需求,最终实现其产量、植株磷钾养分吸收量达到HY处理的98%、91%和85%,从而提高了磷、钾肥回收利用率。说明ISSM方式各方面措施的组合更合理,产量效益和资源利用效率更高。因此,该区域春玉米生产中首先应因地制宜进行适当增密,建议在7万株/hm²为宜,以构建合理的群体结构;进而通过合理的耕作措施,增加深松以促进玉米根系良好生长,同时优化施肥管理以匹配其养分需求的数量与时期,从而保障获得高产和资源高效利用。

良好的土壤结构和肥力状况是作物生产获得持续高产的必要基础,因此农业生产不仅要提高作物产量和养分效率,还要考虑土壤肥力的维持和提升^[20]。一般来说,表层土壤的肥力高于下层土壤,而且农田耕层土壤受施肥、耕作等措施的影响较大,养分含量也较高,特别是移动性较小的磷素易在土壤表层累积^[21]。本研究发现,HY和ISSM处理较FP处理显著增加了土壤磷、钾的养分含量,主要原因可能是采用了有机-无机配合的施肥方式。通过增施有机肥,HY和ISSM处理为土壤补充了大量有机物质,提供了长期稳定的养分释放来源,而且改善了物理

结构、促进团聚体形成,从而增强了土壤的供肥保肥能力^[22]。另外,耕作措施的调整可能也对HY和ISSM处理土壤磷、钾养分含量的提高有一定的作用。研究发现,深松措施可以改善土壤通气性、增加土壤溶液,从而促进速效磷、钾养分的转化、释放及其植物有效性^[23]。

土壤团聚体是构成土壤的基本组成单元,作为土壤养分储藏与固存的重要载体,能够协调土壤水肥气热,促进土壤养分循环。Six等^[24]认为>0.25 mm的大团聚体是土壤中较好的结构体,其所含养分对于土壤肥力保持发挥着至关重要的作用。本研究中,>0.25 mm大团聚体的速效磷和速效钾含量均高于微团聚体,因此,大团聚体对于土壤磷、钾养分具有一定的转运和富集作用。HY和ISSM处理可能通过提高大团聚体数量,促进土壤养分随之迁移和聚集,从而显著增加了土壤团聚体中的养分含量^[25]。尽管HY处理的土壤整体和团聚体中磷、钾养分的含量均高于ISSM处理,但其化肥和有机肥的投入量也更高。ISSM处理通过适宜的耕作和施肥方式,其大多数土壤磷、钾养分含量指标接近或达到HY处理水平,说明其对于磷、钾肥养分的留存能力以及土壤肥力的改善效果更强。因此,玉米生产中应在优化耕作措施的基础上,重视有机物料的补充,增施有机肥或进行秸秆还田^[4],以促进团聚体结构的改善从而改良土壤结构、提升土壤肥力,为作物的高产稳产提供坚实基础。

综上,本研究基于为期12 a的长期定位试验发现,ISSM处理促进了春玉米的持续高产稳产和磷、钾养分的高效吸收利用。其年平均籽粒产量和植株磷、钾养分吸收量分别能够达到HY方式的98%、91%和85%,较FP处理显著增加26%、24%和32%,并且能够提高磷、钾肥回收利用率。同时,ISSM处理相比FP处理土壤磷、钾养分含量大幅提高,特别是团聚体中磷、钾养分含量,部分指标均接近或达到HY处理水平。因此,土壤-作物系统综合管理方式实现了作物高产、土壤培肥和资源高效的综合目标,可作为东北春玉米优化栽培管理、促进农业绿色可持续发展的有效方法。

参考文献 References

- [1] 自由路.植物营养与肥料研究的回顾与展望[J].中国农业科学,2015,48(17):3477-3492.BAI Y L.Review on research in

- plant nutrition and fertilizers [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2015, 48(17): 3477-3492 (in Chinese with English abstract).
- [2] 黄高强. 我国化肥产业发展特征及可持续性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. HUANG G Q. Study on the development characteristics and sustainability of chemical fertilizer industry in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [3] 屈小荣, 亓昭英. 我国钾肥行业现状及未来发展趋势分析[J]. *肥料与健康*, 2020, 47(5): 7-11. QU X R, QI Z Y. Analysis of current situation and future development trend of China's potash fertilizer industry [J]. *Fertilizer & health*, 2020, 47(5): 7-11 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李小坤, 任涛, 鲁剑巍. 长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 13-20. LI X K, REN T, LU J W. Integrate dregulation of nitrogen fertilizer for increasing yield and efficiency of rice-oilseed rape rotation system in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 13-20 (in Chinese with English abstract).
- [5] ZHANG F S, CUI Z L, FAN M S, et al. Integrated soil-crop system management: reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China [J]. *Journal of environmental quality*, 2011, 40(4): 1051-1057.
- [6] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [7] CUI Z L, DOU Z X, YING H, et al. Producing more with less: reducing environmental impacts through an integrated soil-crop system management approach [J]. *Frontiers of agricultural science and engineering*, 2020, 7(1): 14-20.
- [8] LIU X J, VITOUSEK P, CHANG Y H, et al. Evidence for a historic change occurring in China [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(2): 505-506.
- [9] CHEN X P, CUI Z L, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [10] ZHANG F S, CUI Z L, CHEN X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China [M]// SPARKS D. *Advances in agronomy: volume 116*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-40.
- [11] LIU Z, GAO J, GAO F, et al. Integrated agronomic practices management improve yield and nitrogen balance in double cropping of winter wheat-summer maize [J]. *Field crops research*, 2018, 221: 196-206.
- [12] WANG Y, CAO Y Q, FENG G Z, et al. Integrated soil-crop system management with organic fertilizer achieves sustainable high maize yield and nitrogen use efficiency in northeast China based on an 11-year field study [J/OL]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1078 [2021-11-25]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081078>.
- [13] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(1): 1-10. LÜ X X, DING X L, ZHANG B, et al. Effects of long-term fertilization and plastic-mulching on the stability and organic carbon contents of brown soil aggregates [J]. *Journal of agricultural resources and environment*, 2018, 35(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [14] 颜娟. 农艺措施对玉米生长、养分吸收和氮磷流失的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. YAN J. Effects of agronomic measures on growth nutrient absorption and nitrogen and phosphorus loss of maize [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [15] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(3): 95-98. HUANG Z H, WANG S Y, BAO Y, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high yield maize [J]. *Maize science*, 2007, 15(3): 95-98 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 1226-1233. YANG J S, GAO H Y, LIU P, et al. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn [J]. *Acta agronomica sinica*, 2010, 36(7): 1226-1233 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨罗浩, 彭福燕, 高俊阳, 等. 不同种植密度和施肥水平下湖北第二季晚粳群体物质生产特征及其与产量形成的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(5): 76-84. YANG L H, PENG F Y, GAO J Y, et al. Matter production characteristics of two-season late japonica populations with different planting densities and fertilizer levels in Hubei Province and their relationships with yield [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(5): 76-84 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 647-656. LI H, FENG H C, REN T Z, et al. Effects of deep rotary sub-soiling tillage method on brown physical properties and maize growth in northeast of China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2013, 46(3): 647-656 (in Chinese with English abstract).
- [19] 侯云鹏, 孔丽丽, 蔡红光, 等. 东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3559-3572. HOU Y P, KONG L L, CAI H G, et al. The accumulation and distribution characteristics on dry matter and nutrients of high-yielding maize under drip irrigation and fertilization conditions in semi-arid region of northeastern China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2019, 52(20): 3559-3572 (in Chinese with English abstract).
- [20] 程伟威, 王婷, 范茂攀, 等. 玉米不同种植模式对坡耕地红壤团聚体的影响[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(15): 33-38. CHENG W W, WANG T, FAN M P, et al. Effects of different planting patterns of maize on red soil aggregates in sloping farmland [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2019, 58(15): 33-38 (in Chinese with English abstract).
- [21] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和Olsen-P的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 90-98. QU J F, LI J M, XU M G, et al. Total-P and Olsen-P dynamics of long-term experiment without fertilization [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2008, 14(1): 90-98 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3133-

3139. XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia agricultura sinica*, 2008, 41(10): 3133-3139 (in Chinese with English abstract).
- [23] 朱文新. 深松和灌水次数对春玉米根系环境及生长发育的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016. ZHU W X. Effect on system environment and the growth and development by subsoil and irrigation times of springs maize[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [24] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil science society of America journal*, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [25] 柳开楼. 长期施肥下 pH 和有机碳影响红壤团聚体钾素分配的机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. LIU K L. Mechanism of pH and organic carbon levels influencing aggregate-associated potassium distribution in red soil under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese with English abstract).

Long-term effects of integrated soil-crop system management on spring maize yield and use efficiency of phosphorus and potassium

CAO Yaqi, WANG Yin, ZHU Lin, LI Yuxi, ZHENG Chunyu,
CHEN Anji, FENG Guozhong, GAO Qiang

*College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University/
Key Laboratory of Straw Comprehensive Utilization and Black Soil Conservation,
Ministry of Education / Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources
in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun 130118, China*

Abstract In order to evaluate the application effectiveness of integrated soil-crop system management (ISSM) and provide technical support for sustainable high yield and efficiency in regional crop production, based on the long-term (2009—2020) located experiment we discussed the effects of no fertilization (CK), farmer's practice (FP), high yield management (HY) and ISSM on maize yield, plant phosphorus (P) and potassium (K) uptake, use efficiency and soil P and K nutrient status. The results showed that the grain yield in CK treatment decreased dramatically during the 12-year experimental period, a slightly decreased yield trend was found in FP treatment, while continually increased yields trends were observed in HY and ISSM treatments. Compared with FP treatment, ISSM treatment significantly increased the average yield and plant P and K uptake by 26%, 24% and 32%, respectively, and reached 98%, 91% and 85% of those in HY treatment. The average use efficiency of P and K fertilizer in ISSM treatment were 18.7, 1.2 units higher than those in FP treatment, and 17.4, 24.8 units higher than those in HY treatment, respectively. Compared with FP treatment, the 12-year adopting ISSM significantly increased total and available contents of P and K in 0-20 and 20-40 cm soil layers, and available contents of P and K for all the aggregate size fractions in 0-20 cm soil layer. The positive and significant correlations were observed between all the measured parameters, of which the stronger correlations were found among grain yield, plant P and K uptake and use efficiency, as well as between soil P and K contents and those in the aggregate fractions that > 0.25 mm size. In conclusion, ISSM could achieve long-term high and stable yield for spring maize, increase P and K uptake and utilization in plants, and improve soil P and K nutrient supply capacity, consequently promote the sustainable development in the whole soil-crop system.

Keywords integrated soil-crop system management; maize; yield; phosphorus; potassium; high yield and high efficiency; soil fertility; green and sustainable development

(责任编辑: 赵琳琳)