制种玉米连作恒量施磷对灌漠土与潮土中磷素利用的影响

赵芸晨[1,2]，王治江[1]，孙晓娟[1]，付余业[3]

(1. 河西学院 农业与生物技术学院，甘肃 张掖 734000；2. 甘肃省河西走廊特色资源利用重点实验室，甘肃 张掖 734000；3. 甘肃张掖市中天农业科技有限公司，甘肃 张掖 734000)

摘　要：[目的] 研究恒量外源磷施用对玉米种子生产的影响，为合理施磷提供依据。[方法] 通过大田定位与实验室分析相结合，选用河西走廊石灰性潮土及灌漠土定位施肥。[结果] 制种玉米连作 8 a，恒量磷二铵 525 kg/(hm² · a)施用，除无机态二钙磷(Ca_2-P)外，2 种不同土类总磷(T-P)、速效性磷(Av-P)、总无机磷(T-IP)、总有机磷(T-OP)，以及其他各分级无机、有机磷组分均显著增加。无机磷占全磷总量 65.2%～70.2%，有机磷占全磷总量 6.5%～11.4%。无机磷中十钙磷(Ca_{10}-P)＞八钙磷(Ca_8-P)＞铝磷(Al-P)＞铁磷(Fe-P)＞闭蓄态磷(O-P)。有机磷中活性有机磷(MLO-P)＞高稳性(HRO-P)＞中稳性有机磷(MRO-P)＞活性有机磷(LO-P)。随连作年限增加，灌漠土 Ca_{10}-P 在连作第 5 a 达到最大，Al-P，O-P 均持续增加；潮土 Ca_{10}-P 持续增加，Fe-P，O-P 在连作第 5 a 达到最大，磷增加量为 3.94%～37.28%。0—60 cm 土层，两种土类无机磷各组分含量均呈现由表层至下层递减特点，但不同分级磷在不同土层所占比例不同，Ca_{10}-P，Al-P，O-P，MRO-P 底聚，Ca_2-P，HRO-P 表聚，制种玉米连作生产 8 a，磷肥最大表观利用率为 4.89%，磷素活化系数＜2%，外源磷肥以 174.3 kg/(hm² · a)残余在土壤中。[结论] 制种玉米连作，总磷转化率低，磷素移动缓慢，大部分以溶解性较低的磷素形态在土壤表层积累，但随连作年限增加，土壤对磷素的固持及转化率下降，表现底聚趋势，对生态环境健康存在极大风险，应减量或停止施磷。潮土磷肥施用应采取更加合理措施。

关键词：灌漠土；潮土；无机磷；磷活性；速效磷；有机磷

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2018)01-0047-09　　**中图分类号**：S151.9，S513

文献参数：赵芸晨，王治江，孙晓娟，等. 制种玉米连作恒量施磷对灌漠土与潮土中磷素利用的影响[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：47-55. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.009. Zhao Yunchen, Wang Zhijiang, Sun Xiaojuan, et al. Effects of constant phosphorus fertilization and continuous cropping of corn seed on phosphorus utilization of irrigated desert soil and alluvial soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 47-55.

Effects of Constant Phosphorus Fertilization and Continuous Cropping of Corn Seed on Phosphorus Utilization of Irrigated Desert Soil and Alluvial Soil

ZHAO Yunchen[1], WANG Zhijiang[1], SUN Xiaojuan[1], FU Yuye[2]

(1. *School of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Zhangye, Gansu* 734000, *China*;
2. *Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu, Zhangye, Gansu* 734000, *China*;
3. *Agriculture Science Limited Liability Company of Zhongtian in Zhangye City, Gansu Province, Zhangye, Gansu* 734000, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of constant phosphorus fertilization on corn seed production were studied to provide the basis for reasonable phosphorus fertilizer application. [Methods] Field experiments and laboratory analysis were conducted in irrigated desert soil and alluvial soil. [Results] Except for Ca_2-P, total phosphorus, available phosphorus, total inorganic phosphorus, total organic phosphorus, and the other fractions of inorganic and organic phosphorus increased significantly under 8 years continuous cropping of

收稿日期：2017-08-11　　**修回日期**：2017-09-14

资助项目：甘肃省陇原青年创新人才项目“草本花卉水肥耦合高效制种体系研究”(2050205-1)

第一作者：赵芸晨(1975—)，女(汉族)，甘肃省张掖市人，博士，主要从事土壤肥料与植物营养研究。E-mail：yr1826@126.com。

corn seed with 525 kg/(hm^2 · a) of chemical phosphorus fertilizer. The inorganic phosphorus amounted to 65.2%～70.2% of total phosphorus, while organic phosphorus accounted for 6.5%～11.4%. Ca_{10}-P>Ca_8-P>Al-P>Fe-P>O-P. MLO-P >HRO-P>MRO-P>LO-P. Ca_{10}-P reached to the highest at 5th year, and Al-P and O-P increased constantly in irrigated desert soil. Ca_{10}-P increased constantly while Al-P and O-P reached to the highest at 5th year in alluvial soil. The phosphorus increased by 3.94%～37.38%. Inorganic phosphorus declined from soil surface downward to a depth of 60 cm. The proportion of different fraction varied in different soil layers. Ca_{10}-P, O-P, Al-P and MRO-P was gathered in soil layer of 40—60 cm while Ca_2-P and HRO-P gathered in soil layer of 0—20 cm. The highest apparent efficiency of phosphorus fertilizer was 4.89% and phosphorus active coefficient was lower than 2% after 8 years continuous cropping. And the residual of exogenous phosphorus was 174.3 kg/(hm^2 · a) which means the lower conversion ratio of total phosphorus. [Conclusion] The movement of phosphorus was slow in two soils and accumulated with lower soluble fractions in surface soil layer with continuous cropping. The proportion of attachment and retention and the transportation of phosphorus by soil decreased constantly and possibly gathered toward bottom layer, which will cause high ecological risks on healthy development of ecological environment. Phosphorus fertilizer should be decreased or stop to use, also some suitable methods should be used for phosphorus utilization on alluvial soil.

Keywords: irrigated desert soil; alluvial soil; inorganic phosphorus; phosphorus activity; available phosphorus; organic phosphorus

磷素在农业生产与环境安全中具有重要影响，磷肥当季利用率低，在土壤中移动性小，固定强烈[1]；磷素施用后的产量效应逐渐降低，农田土壤磷素环境风险逐渐增大[2-3]，磷素已经成为农业生产的重要限制因素，研究表明随着土壤磷素大量积累，土壤磷素逐渐由亏转盈[4-5]，70%～90%的磷成为难以被作物吸收利用的固定形态[6]。石灰性土壤 12 a 磷肥施用，无机态磷大量增加[6]。棕壤 26 a 化学磷肥施用，除十钙磷以外的其他磷素均增加[7]。

河西走廊张掖是全国玉米制种大区，玉米种子产量占全国用种量 70%以上，为当地经济提供了巨大贡献。高利益驱动下，使玉米制种地块连作严重，且 85%以上农田采用恒量施肥模式，势必会对玉米种子生产造成相应的影响，因此研究制种玉米连作恒量施磷模式下土壤磷素动态变化、土壤—植物磷素平衡，以及植物磷素吸收利用效率问题对该区玉米种子生产及当地生态环境变化都具有重要意义。作者前期研究表明 10 a 制种玉米连作生产，土壤总磷含量增加，速效磷先增后降[8]，但恒量施肥模式，长期连作，不同土类土壤磷素迁移、分级的研究报道还未见，外源磷素进入后在土体后发生的运移、转化、积累、吸收利用动态，及其变化对生态环境影响的研究也未见报道。基于此，本研究拟以当地 2 种代表性石灰性灌漠土与石灰性潮土为研究对象，玉米制种连作 8 a，研究连作条件 2 种不同土类土壤磷素动态变化特征及磷素养分亏缺、吸收利用规律，以期阐明制种玉米连作土壤磷素动态变化情况，为合理施磷，提高磷肥利用率，高产优质玉米种子生产提供合理的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省张掖市乌江镇(海拔 1 400 m，东经 106°33′—107°47′，北纬 37°04′—38°10′，土壤类型灌漠土)与张掖市临泽县鸭暖乡(海拔 1 600 m，东经99°51′—99°57′，北纬 38°57′—39°02′，土壤类型潮土)，2 种土壤基本理化性状：灌漠土，pH 值 8.4，有机质 17.5 g/kg，全氮 0.91 g/kg，全磷 0.661 g/kg，碱解氮 63 mg/kg，速效磷 7.5 mg/kg，速效钾 160 mg/kg。潮土 pH 8.7，有机质 13.5 g/kg，全氮 0.83 g/kg，全磷 0.635 g/kg，碱解氮 56 mg/kg，速效磷7.1 mg/kg，速效钾 167 mg/kg。

1.2 供试品种

供试玉米品种为浚单 22(河南秋乐种业集团提供)，播前种子包衣，包衣剂代号 Q23，种子成熟后收获全株，籽粒与秸秆分别收获，秸秆不还田，测定籽粒、秸秆产量及籽粒、秸秆全磷含量。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计，连续定位恒量施肥模式，于 2006 年开始，小区面积 30 m×20 m，3 次重复，小区四周设置保护行，制种玉米种植模式为“行比

加满天星”,播前覆膜。种植期间只施尿素与磷二铵,其中二铵用量 525 kg/hm²(磷二胺,P_2O_5 48%),氮肥用量 675 kg/hm²(尿素,N 46%),播前以底肥形式施入全部磷肥与 1/3 氮肥,拔节期及孕穗期追施剩余 2/3 尿素,通过药剂防治红蜘蛛及其他常见病虫害,常规水肥管理,灌漠土小区代号 A,潮土区代号 B。

1.4　分析项目及方法

土壤与植物样品:分别在连作的第 1,3,5,7 a 地上部分分秸秆与籽粒分别取样(因 2014 年鸭暖乡试验地受虫害影响没有取样,于连作第 8 a 取样)为植物样品,测定全磷含量,以未施磷区为空白对照 CK。全株采收后利用 5 点法,每小区取 6 个样点混合成一个土壤样品,风干后测定全磷、速效磷,并分析磷的活化系数,样品名称分别为 A_1,A_3,A_5,A_7 和 B_1,B_3,B_5,B_8;在 0—20,20—40,40—60 cm 分层采样,样品名称仍为 A_1,A_3,A_5,A_7 和 B_1,B_3,B_5,B_8,分析无机与有机分级磷。

测定项目与方法:土壤全磷量采用碳酸钠熔融—钼锑抗比色法[9]。速效磷采用 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法。土壤无机磷分级采用顾益初和蒋柏藩法[10],用 0.25 mol/L 的 $NaHCO_3$ 溶液浸提土壤二钙磷,用0.5 mol/L 的 NH_4OAC(pH=4.2)溶液浸提土壤八钙磷,用 0.5 mol/L 的 NH_4F 溶液浸提土壤铝磷,用 0.1 mol/L 的 NaOH 与 0.1 mol/L 的 Na_2CO_3 混合溶液浸提铁磷,用 0.3 mol/L 柠檬酸钠-$Na_2S_2O_4$ 溶液浸提闭蓄态磷,用 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液浸提十钙磷,然后在分光光度计上采用硫酸钼锑比色法测定。土壤有机磷分级采用 Bowman-Cole 法[11],用0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ 浸提活性有机磷,1 mol/L 的 H_2SO_4 与 1 mol/L 的 NaOH 浸提中等活性有机磷,0.5 mol/L 的 NaOH 浸提中稳性有机磷,0.5 mol/L 的 NaOH 浸提高稳性有机磷,硫酸钼锑抗比色法测定。玉米籽粒与秸秆中全磷含量采用 H_2O_2—H_2SO_4 消煮—钼锑抗比色法测定[9]。

1.5　数据处理与统计

采用 Excel 2007,SPSS 10.0 软件对数据进行统计分析和处理,采用单因素方差分析对数据进行显著性检验,采用 Person 法对所有数据进行相关性分析。

表观磷平衡(%)(SPB)[12]=(输入磷−输出磷)/输出磷×100%　(1)

磷素活化系数(%)(PAC)[13]=(土壤速效磷含量/土壤全磷含量)×100%　(2)

作物磷素移出量(PTA)[14]=(籽粒全磷量×籽粒产量)+(秸秆全磷量×秸秆产量)　(3)

磷肥表观利用率(%)(APUE)[15]=(施肥区作物养分含量−不施肥作物养分含量)×100/施肥量　(4)

2　结果与分析

2.1　制种玉米连作恒量施肥模式土壤磷素构成特征

连作 8 a,2 种连作土壤全磷含量分别为 719.82 与 705.24 mg/kg,较处理前(0.661 与 0.635 g/kg)增加,增加量分别为 58.01 与 69.91 mg/kg,年平均增加量为 8.28 与 8.75 mg/kg,增加率为 8.76%～11.01%。灌漠土速效磷含量先增后降,潮土中速效磷含量持续增加,2 种土类速效磷较处理前分别增加 1.66～4.64 与 1.01～4.04 mg/kg。磷的活化系数(PAC)为 1.274%～1.794%,均小于 2%(表 1)。

表 1　制种玉米连作总磷与速效磷的变化

项 目	A_1 土样	A_3 土样	A_5 土样	A_7 土样	B_1 土样	B_3 土样	B_5 土样	B_8 土样
T-P/(mg·kg⁻¹)	670.91^{c}	675.29^{c}	700.28^{b}	719.82^{a}	636.39^{d}	648.22^{c}	676.24^{b}	705.24^{a}
Av-P/(mg·kg⁻¹)	9.11^{c}	11.20^{b}	12.56^{a}	12.14^{ab}	8.11^{d}	9.22^{c}	10.24^{b}	11.14^{a}
PAC/%	1.358	1.659	1.794	1.663	1.274	1.422	1.514	1.580

注:同行不同小写字母表明差异显著性($p<0.05$);T-P 代表总磷;Av-P 代表速效性磷;PA 代表磷活化系数。下同。

连作 8 a,土壤磷素组成以无机磷为主,占全磷总量 65.3%～70.2%,无机磷主要以钙磷(Ca-P)为主,其次为铝磷(Al-P)和铁磷(Fe-P),而闭蓄态磷(O-P)只占全磷很少部分。钙磷中十钙磷(Ca_{10}-P)含量最高,其次为八钙磷(Ca_8-P),最后为二钙磷(Ca_2-P)(表 2)。总有机磷占全磷含量的 6.3%～11.4%,主要以中度活性有机磷(MLO-P)为主,其次为中稳性(MRO-P)和高稳性有机磷(HPO-P),活性有机磷(LO-P)含量最低(表 3)。随连作年限增加、无机化肥连续施用,土壤不同磷素:Al-P,Fe-P,Ca_8-P,Ca_{10}-P,LO-P,MLO-P 均增加(表 2—3)。制种玉米连作 8 a,灌漠土中 T-P,Ca_{10}-P,Ca_2-P,Av-P,LO-P 含量较潮土高,而 Fe-P,Ca_8-P,MLO-P,HPO-P 与 MRO-P 含量较潮土低,O-P 相差不大(表 2—3)。

表 2 研究区不同连作年限土壤无机磷在不同土层含量特征 mg/kg

磷分级	土层/cm	无机磷含量							
		A_1 土样	A_3 土样	A_5 土样	A_7 土样	B_1 土样	B_3 土样	B_5 土样	B_8 土样
Ca_2-P	0—20	35.53^{b}	44.43^{a}	33.00^{bc}	28.71^{c}	35.33^{ab}	31.34^{b}	36.78^{a}	30.88^{b}
	20—40	30.23^{b}	35.12^{a}	20.51^{c}	20.89^{c}	26.12^{a}	23.23^{b}	25.16^{a}	20.23^{b}
	40—60	24.54^{ab}	26.45^{a}	15.03^{b}	14.74^{b}	20.24^{a}	16.63^{c}	18.46^{b}	15.01^{c}
Ca_8-P	0—20	86.05^{c}	89.94^{b}	90.30^{b}	94.83^{a}	85.90^{bc}	83.17^{c}	88.66^{b}	99.55^{a}
	20—40	78.67^{b}	80.28^{b}	89.85^{a}	79.99^{b}	72.22^{b}	70.13^{c}	70.45^{c}	75.33^{a}
	40—60	56.57^{a}	56.22^{a}	42.31^{c}	45.68^{b}	37.03^{c}	42.52^{b}	44.67^{a}	46.23^{a}
Al-P	0—20	57.01^{d}	59.65^{c}	66.68^{b}	71.18^{a}	52.07^{d}	57.58^{c}	64.96^{b}	73.90^{a}
	20—40	38.23^{c}	40.58^{c}	48.00^{b}	53.19^{a}	36.12^{b}	38.04^{b}	43.27^{a}	45.31^{a}
	40—60	36.41^{bc}	37.36^{b}	38.12^{b}	42.35^{a}	34.89^{b}	36.13^{b}	41.55^{a}	43.78^{a}
Fe-P	0—20	3.84^{b}	3.81^{b}	4.44^{a}	4.40^{a}	5.26^{b}	4.92^{c}	5.78^{a}	5.68^{a}
	20—40	2.62^{c}	2.53^{c}	3.38^{b}	3.52^{a}	4.15^{a}	3.73^{c}	4.06^{b}	4.02^{b}
	40—60	2.14^{d}	2.38^{c}	3.07^{b}	3.27^{a}	3.27^{a}	2.46^{c}	3.12^{b}	3.24^{a}
O-P	0—20	1.80^{b}	1.73^{b}	2.34^{a}	2.37^{a}	1.99^{b}	2.01^{b}	2.37^{a}	2.08^{b}
	20—40	1.32^{b}	1.32^{b}	1.89^{a}	1.91^{a}	1.32^{c}	1.50^{b}	1.98^{a}	1.57^{b}
	40—60	1.39^{b}	1.29^{b}	1.70^{a}	1.77^{a}	1.33^{b}	1.39^{b}	1.51^{a}	1.35^{b}
Ca_{10}-P	0—20	253.52^{c}	247.09^{d}	295.07^{a}	276.44^{b}	241.16^{b}	247.45^{b}	270.15^{a}	275.30^{a}
	20—40	205.22^{b}	207.23^{b}	218.32^{a}	200.23^{c}	178.24^{b}	182.09^{a}	183.67^{a}	179.25^{b}
	40—60	150.04^{c}	163.41^{b}	179.65^{a}	169.22^{b}	142.10^{b}	147.12^{a}	147.22^{a}	147.00^{a}
T-IP	0—20	437.76^{c}	446.64^{c}	491.83^{a}	477.91^{b}	421.71^{c}	426.47^{c}	468.71^{b}	487.39^{a}
	20—40	356.30^{c}	367.07^{b}	381.94^{a}	359.72^{c}	318.19^{b}	318.73^{b}	328.59^{a}	325.72^{a}
	40—60	271.10^{b}	287.12^{a}	279.89^{b}	277.03^{b}	238.86^{b}	246.24^{a}	256.54^{a}	256.61^{a}

注：表中不同小写字母表明差异显著性($p<0.05$)；Ca_2-P 代表二钙磷；Ca_8-P 代表八钙磷；Al-P 代表铝磷，Fe-P 代表铁磷；O-P 代表闭蓄态磷；Ca_{10}-P 代表十钙磷；T-IP 代表总无机磷。下同。

表 3 研究区制种玉米连作有机磷在不同土层的分部特征 mg/kg

磷分级	土层/cm	有机磷含量							
		A_1 土样	A_3 土样	A_5 土样	A_7 土样	B_1 土样	B_3 土样	B_5 土样	B_8 土样
LO-P	0—20	2.73^{c}	2.93^{c}	4.72^{b}	5.13^{a}	1.54^{d}	1.83^{c}	2.29^{b}	3.51^{a}
	20—40	2.46^{c}	2.69^{c}	3.66^{a}	3.17^{b}	1.23^{d}	1.38^{c}	1.67^{b}	2.28^{a}
	40—60	1.03^{c}	1.52^{b}	2.55^{a}	2.24^{ab}	0.95^{c}	1.02^{c}	1.32^{b}	1.86^{a}
MLO-P	0—20	35.35^{c}	36.27^{c}	44.66^{b}	48.31^{a}	27.47^{d}	32.44^{c}	37.22^{b}	47.89^{a}
	20—40	24.12^{c}	31.22^{b}	40.27^{ab}	42.15^{a}	20.11^{d}	23.02^{c}	26.35^{b}	42.99^{a}
	40—60	21.88^{c}	22.56^{c}	26.34^{b}	30.06^{a}	15.18^{c}	16.00^{c}	18.46^{b}	27.35^{a}
MRO-P	0—20	4.37^{c}	4.18^{d}	4.98^{b}	5.24^{a}	3.18^{d}	3.77^{c}	4.78^{b}	6.53^{a}
	20—40	3.76^{d}	4.01^{c}	4.32^{b}	4.79^{a}	2.69^{d}	3.13^{c}	3.87^{b}	5.45^{a}
	40—60	2.44^{b}	2.83^{a}	2.93^{a}	2.99^{a}	1.99^{d}	2.95^{c}	3.33^{b}	4.88^{a}
HRO-P	0—20	12.93^{a}	11.68^{b}	10.78^{c}	10.18^{d}	8.13^{d}	18.72^{c}	27.15^{a}	22.35^{b}
	20—40	6.58^{b}	7.27^{a}	6.12^{c}	5.98^{d}	5.37^{d}	13.23^{c}	19.13^{a}	17.35^{b}
	40—60	3.02^{d}	4.70^{a}	3.87^{b}	3.52^{c}	4.14^{c}	8.44^{b}	13.26^{a}	13.24^{a}
T-OP	0—20	55.38^{b}	55.07^{b}	65.14^{ab}	68.87^{a}	40.32^{d}	56.76^{c}	71.45^{b}	80.28^{a}
	20—40	36.92^{c}	45.18^{b}	54.37^{ab}	56.10^{a}	29.40^{d}	40.77^{c}	51.02^{b}	68.07^{a}
	40—60	28.38^{c}	31.61^{b}	35.70^{a}	37.82^{a}	28.25^{d}	28.41^{c}	36.36^{b}	47.33^{a}

注：LO-P 代表活性有机磷；MLO-P 代表中度活性有机磷；MRO-P 代表中稳性有机磷；HRO-P 代表高稳性有机磷；T-OP 代表总有机磷。下同。

2.2 制种玉米连作无机磷动态变化特征

恒量施磷模式下，随着施肥年限增加，无机磷总量增加，增加比率为 14%～18%。无机磷分级钙磷所占比重最大，占无机磷总量 81.15%～88.16%，其次

为铝磷,占无机磷总量 10.73%～16.20%,闭蓄态磷含量最小,只占 0.36%～0.64%。钙磷中 Ca_2-P,Ca_8-P,Ca_{10}-P 分别占无机磷总量 5.32～9.95%,15.50～23.52%,55.66～64.19%,Ca_{10}-P 所占比重最大。2 种不同土类随磷肥施用年限增加:除 Ca_2-P 显著减少外,Ca_8-P,Ca_{10}-P,Al-P,Fe-P,O-P 均增加;Fe-P 在连作第 3 a 降至最低;灌漠土 Ca_{10}-P 在连作第 5 a,潮土 Ca_{10}-P 在连作第 8 a 达最大,Ca_8-P 动态变化。灌漠土 Ca_2-P 下降速率较潮土大,Ca_{10}-P 增加量较潮土高,Ca_8-P 与 Al-P 增加量较潮土低。不同剖面土层由上至下,各分级无机磷均呈现递减趋势(表 4),但各形态无机磷在不同土层所占总无机磷比例不同,Ca-P 在 20—40 cm 土层比例最高,其次为 0—20 cm 土层,40—60 cm 土层最低,O-P 在 40—60 cm 土层比例最高,Al-P 在 20—40 cm 土层比例最低,Fe-P 在 0—20 cm 比例最高。

Ca-P 中,Ca_{10}-P 在 40—60 cm 土层比例最高,Ca_2-P 在 0—20 cm 土层比例最高,Ca_8-P 在 20—40 cm 土层最高(表 4)。无机磷增加主要以 Ca_8-P 与 Ca_{10}-P 增加,呈现 Ca_{10}-P,O-P 底聚,Ca_2-P,Fe-P,Al-P表聚在 0—20 cm,Ca_8-P 中层(20—40 cm)聚集现象(表 4)。

表 4　不同无机磷在不同土层占总无机磷的比例　　%

磷分级	土层/cm	无机磷比例							
		A_1 土样	A_3 土样	A_5 土样	A_7 土样	B_1 土样	B_3 土样	B_5 土样	B_8 土样
Ca-P	0—20	85.69	85.41	85.06	83.69	85.93	84.87	84.40	83.25
	20—40	88.16	87.90	86.05	83.71	86.93	86.42	84.99	84.37
	40—60	85.27	85.71	84.68	82.89	83.47	83.77	82.00	81.15
Al-P	0—20	13.02	13.35	13.56	14.89	12.35	13.50	13.86	15.16
	20—40	10.73	11.05	12.57	14.79	11.35	11.94	13.17	13.91
	40—60	13.43	13.01	13.62	15.29	14.61	14.67	16.20	17.06
Ca_2-P	0—20	8.12	9.95	6.71	6.01	8.38	7.35	7.85	6.34
	20—40	8.49	9.57	5.37	5.81	8.21	7.29	7.66	6.21
	40—60	9.05	9.21	5.37	5.32	8.47	6.75	7.19	5.85
Ca_8-P	0—20	19.66	20.14	18.36	19.84	20.37	19.50	18.92	20.43
	20—40	22.08	21.87	23.52	22.24	22.70	22.00	21.44	23.13
	40—60	20.87	19.58	15.12	16.49	15.50	17.27	17.41	18.02
Ca_{10}-P	0—20	57.91	55.32	59.99	57.84	57.19	58.02	57.64	56.48
	20—40	57.60	56.46	57.16	55.66	56.02	57.13	55.89	55.03
	40—60	55.35	56.91	64.19	61.08	59.49	59.75	57.39	57.29
Fe-P	0—20	0.88	0.85	0.90	0.92	1.25	1.15	1.23	1.17
	20—40	0.74	0.69	0.88	0.98	1.30	1.17	1.23	1.24
	40—60	0.79	0.83	1.10	1.18	1.37	1.00	1.22	1.26
O-P	0—20	0.41	0.39	0.48	0.50	0.47	0.47	0.50	0.43
	20—40	0.37	0.36	0.49	0.53	0.42	0.47	0.60	0.48
	40—60	0.51	0.45	0.61	0.64	0.56	0.56	0.59	0.52

2.3　制种玉米连作有机磷组分动态变化特征

如表 5 所示,有机磷各组分以 MLO-P 含量最高,占总有机磷 52.10%～79.49%,其次为 HRO-P,占 9.31%～38.01%,MRO-P 和 LO-P 含量较低,分别占 6.64%～10.31%和 3.21%～8.18%,随连作年限增加,2 种不同土类,土壤总有机磷各组分均增加,其中灌漠土中增加幅度最大的是 MLO-P,其次为 MRO-P 和 LO-P,HRO-P 有下降趋势,LO-P,MLO-P 与 MRO-P 持续增加。

而潮土中有机磷各组分含量均随连作年限增加而持续增加。在不同剖面土层中,2 种不同土类各不同有机磷组分均呈现表层含量最高—表聚现象,但不同组分在不同土层中所占比例不同,灌漠土 LO-P 在 20—40 cm 土层最高,HRO-P 在 0—20 cm 土层最高,MLO-P,MRO-P 在 40—60 cm 土层最高,而潮土 LO-P,MRO-P 在 40—60 cm 土层最高,MLO-P 在 20—40 cm 土层最高,HRO-P 在 0—20 cm 土层最高。

表5 各有机磷在不同土层占总有机磷的分布比例 %

分级磷	土层深度/cm	有机磷比例							
		A_1 土样	A_3 土样	A_5 土样	A_7 土样	B_1 土样	B_3 土样	B_5 土样	B_8 土样
LO-P	0—20	4.93	5.32	7.25	7.45	3.82	3.23	3.21	4.37
	20—40	6.67	5.94	6.73	5.65	4.20	3.40	3.28	3.35
	40—60	3.63	4.82	7.15	5.77	4.24	3.60	3.62	3.94
MLO-P	0—20	63.84	65.87	68.56	70.16	68.13	57.15	52.10	59.65
	20—40	65.33	69.10	74.07	75.14	68.41	56.47	51.64	63.16
	40—60	77.11	71.81	73.79	77.44	68.23	56.32	50.76	57.78
MRO-P	0—20	7.88	7.59	7.65	7.61	7.89	6.64	6.69	8.14
	20—40	10.19	8.88	7.95	8.54	9.14	7.67	7.58	8.01
	40—60	8.60	9.01	8.20	7.71	8.94	10.37	9.17	10.31
HRO-P	0—20	23.35	21.22	16.54	14.78	20.16	32.98	38.01	27.84
	20—40	17.81	16.08	11.26	10.66	18.25	32.46	37.51	25.48
	40—60	10.66	14.96	10.85	9.07	18.58	29.71	36.46	27.98

2.4 制种玉米连作土壤磷素动态平衡变化

依据不同连作年限制种玉米籽粒与秸秆产量,籽粒与秸秆中磷素含量,磷肥施入量以及土壤中磷素含量,得出土壤磷素收支表观利用率等特征(表6)。由表6可以看出,当前恒量施肥模式,外源磷肥进入土壤产生173.10～175.65 kg/(hm^2 · a)的磷肥盈余量。灌漠土在连作第5 a,潮土在连作第3 a植物磷素带走量最大,分别达到79.05与78.15 kg/hm^2,随后下降;而灌漠土在连作第3 a,潮土在连作第5 a磷素吸收量达到最大,分别为147.60与145.2 kg/hm^2,然后下降,磷素的表观利用率只有2.08%～4.89%,磷素表观平衡系数均超过200%以上。

表6 不同土类作物磷素的带走、吸收及可及性

土类	土样	产量/(kg·hm^{-2})		磷带走量(kg·hm^{-2})			表观平衡系数/%		连作磷吸收量/(kg·hm^{-2})			空白磷吸收量/(kg·hm^{-2})			表观利用率/%
		籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	总磷	剩余磷	平衡系数	籽粒	秸秆	总量	籽粒	秸秆	总量	利用率
潮土	B_1	7 170	29 475	17.10	59.25	76.35	175.65	230.24	61.65	79.65	137.25	51.60	21.60	64.05	4.89
	B_3	7 320	29 700	17.40	59.70	77.10	174.90	226.77	62.85	80.25	143.10	51.75	21.75	69.75	2.94
	B_5	7 470	30 000	17.85	60.30	78.15	173.85	222.75	64.20	81.00	145.20	51.30	21.45	72.45	2.25
	B_8	7 230	29 640	17.25	59.55	76.80	175.20	228.19	62.25	80.10	142.20	51.90	21.60	68.70	3.21
灌漠土	A_1	7 545	30 120	18.00	60.60	78.45	173.55	221.03	64.95	81.30	146.25	51.60	21.60	73.05	2.20
	A_3	7 680	30 195	18.30	60.75	79.05	173.10	219.11	66.00	81.60	147.60	52.20	21.60	73.65	2.09
	A_5	7 590	30 090	18.00	60.45	78.60	173.40	220.84	65.25	81.30	146.55	51.75	21.60	73.35	2.09
	A_7	7 575	30 030	18.00	60.30	78.45	173.55	221.48	65.10	81.15	146.25	51.45	21.75	73.20	2.08

注:籽粒/秸秆磷带走量=籽粒/秸秆产量×籽粒/秸秆全磷量,总磷=籽粒磷+秸秆磷,剩余磷=施入磷肥量-总磷,磷肥表观利用率=(施肥区作物养分含量-不施肥作物养分含量)×100/施肥量。

长期单施化肥使土壤磷素的可及性在一定程度上增加,但其增加量有限,分别在灌漠土上连作第3 a,潮土上连作第5 a达到最高,随后下降,作物磷素吸收量也呈现相同规律,先增后降,制种玉米种子生产,总体磷肥利用率极低,大量磷肥在土体中盈余。

2.5 制种玉米连作土壤磷素间相关性分析

土壤各形态磷的相关关系如表7—8所示。由表7可知,在恒量施磷模式,制种玉米连作8 a,土壤全磷与土壤速效磷、总无机磷,八钙磷、十钙磷、铝磷均呈现显著正相关关系,相关系数分别为0.958,0.798,0.875,0.896,0.766,土壤中磷素总量的增加与上述不同形态磷素增加关系密切,土壤无机磷总量与土壤中八钙磷、十钙磷关系密切。土壤速效磷与土壤中全磷、二钙磷、铝磷、八钙磷4项指标关系密切,说明土壤中速效磷的增加与上述磷密切相关。

如表8所示,速效磷与活性有机磷和中度活性有机磷也显著相关。有机磷总量与中活性有机磷、高稳性有机磷关系密切,中活性有机磷与全磷间关系密切。

表 7　各无机磷素间的相关系数

项 目	Av-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca_2-P	Ca_8-P	Ca_{10}-P	T-IP	T-P
T-P	0.958**	0.766*	0.406	−0.512	0.820**	0.875**	0.896**	0.798*	1
T-IP	0.471	0.576	0.367	−0.471	0.742*	0.870**	0.893**	1	
Ca_{10}-P	0.272	0.226	0.404	0.333	0.775*	0.692	1		
Ca_8-P	0.805**	0.356	0.423	−0.58	0.834*	1			
Ca_2-P	0.759*	0.269	0.846*	0.827*	1				
O-P	−0.253	−0.344	−0.851*	1					
Fe-P	0.711	0.488	1						
Al-P	0.774	1							
Av-P	1								

注:* 表示显著相关;* * 表示极显著相关。下同。

表 8　各有机磷素间的相关关系

项 目	T-P	LO-P	HRO-P	MRO-P	MLO-P	T-OP	Av-P
Av-P	0.752*	0.759*	0.526	0.522	0.739*	0.714*	1
T-OP	0.422	0.347	0.842**	0.677	0.832**	1	
MLO-P	0.747*	0.359	0.412	0.201	1		
MRO-P	0.230	0.225	0.623	1			
HRO-P	0.514	0.182	1				
LO-P	0.311	1					
T-P	1						

3　讨 论

3.1　衡量施肥模式对连作制种玉米各形态磷库的影响

外源磷进入土壤后被有机、无机组分吸持,并最终以不同形态赋存于土壤,表现出不同的移动性和生物活性[16]。在本研究中,恒量施磷肥,制种玉米连作 8 a,除 Ca_2-P 以外的其他分级磷,全磷、速效磷均不同程度增加,说明外源无机磷肥施用可使土壤磷素增加,这与裴瑞娜及刘建玲长期施用无机磷均能显著增加土壤中 Olsen-P 含量的研究结论相符[17,6],但不同分级磷在不同土层所占比例不同,说明种子连作生产过程,不同分级磷在土体中转化、累积、移动与被利用的程度不同。其中活性较高的 Ca_2-P 含量显著减少,表明其在连作过程被持续利用,是玉米种子生产主要的有效磷源,特别生产力较高的灌漠土消耗比例较潮土高。本研究中,Ca_8-P 与 Ca_{10}-P 的量呈现积累—消耗—再积累模式,其中 Ca_8-P 层聚在 20—40 cm,Ca_{10}-P 在 40—60 cm 底聚,说明 Ca_8-P 潜在被利用程度较 Ca_{10}-P 高,Ca_{10}-P 被利用程度低。Al-P,Fe-P,O-P 稳步增加,Fe-P 呈现表聚现象,有被潜在利用的可能性。Al-P 随连作年限由表聚变底聚,可利用性由大变小。前人研究表明,Al-P 是石灰性土壤中一种相当有效磷源[18-20],Ca_8-P,Al-P 与 Fe-P 是作物第 2 有效磷源,无机磷对玉米有效性表现为 Ca_2-P > Al-P > Ca_8-P > Fe-P > Ca_{10}-P[20]。O-P 与 Ca_{10}-P 被认为是土壤中非活性磷的赋存形态[21]。本研究中,从相关系数的大小可以看出,各种形态磷对总磷的贡献为:Ca_{10}-P > Ca_8-P > Ca_2-P > Al-P > Fe-P > O-P,各形态磷对速效磷的贡献为 Ca_8-P > Ca_2-P > Al-P > Fe-P > Ca_{10}-P > O-P,这说明本研究石灰性土壤中可有效增加土壤磷含量,但其底聚趋势使其潜在有效被利用程度低,Ca_8-P,Al-P,Fe-P 分布在植物根系较丰富的区域,潜在被利用的程度较大,为潜在有效磷源,但其活性不同,在土壤中移动性也不同,在不同土层的积累量之间存在差异。由无机磷、速效磷的增加比率可以看出,河西走廊石灰性土壤恒量施磷,速效磷转化比率小,有部分磷转化为潜在植物磷源,还有大部分磷转化成难利用性无机磷,如 Ca_{10}-P,逐渐向土壤下层移动,造成土壤中磷的累积。O-P 也是作物潜在磷源[22],但在本研究中,闭蓄态磷在土壤剖面中含量最低,且呈现明显底聚现象,潜在被转化利用的可能性较小。由上可以看出,不同磷素增加,但主要以难溶性磷增加为主,且磷土壤中的移动性都较小,造成土壤磷空间分布不均,土体剖面磷素动态分布不平衡现象,从而影响作物根系对养分的吸收,使所施磷肥的空间有效性降低。

本研究中,有机磷各形态增加,且均呈现表层含量较高现象,可以作为潜在磷源。中活性与活性有机磷可以作为植物有效磷供应的指标之一。从相关系数可以看出,长期单施化肥能促进植物难以利用的高稳性有机磷向活性、中活性有机磷转化,施肥处理有利于增加耕层活性、中活性有机磷的含量。

3.2 衡量施磷模式制种玉米连作磷素动态利用与磷肥施用关系

作物对磷素的吸收利用不仅取决于土壤磷的含量和形态,还取决于磷素在土壤中的运移,无机磷是作物吸收利用的主要磷源,其在土壤中的含量和形态影响作物对磷素的吸收与利用,而有机磷对作物磷素的吸收也具有一定的影响。土壤全磷的变化与许多因素有关,许多研究表明长期过量施肥会导致土壤全磷含量升高[23],本研究中,磷的增加量与土壤全磷变化线性相关,每年在土体中盈余较多磷肥,外源输入磷量远大于产品磷输出量,说明全磷增加与外源磷肥进入直接相关,外源磷肥施入导致磷素在土壤中的积累,这与孙宁科等[24]24 a 田间定位研究结果相似。本研究不同分级磷不同土层增加程度不同,说明肥料磷进行了部分转化与移动。施入土壤的无机磷肥,主要向植物难利用的 Ca_{10}-P,MRO-P,HRO-P 转化,这可能与二铵的效应有关,二铵施入土壤后,会引起土壤磷酸盐及土壤原有铁铝矿物发生分解,释放铁铝,减少对肥料磷的固定和限制磷肥迁移有关[25],不过金亮等[25]认为短时间内肥料磷不会转化形成结晶态的难溶性含磷矿物,仍以水溶态存在,可以得出水溶态磷肥短期肥料效应与长期肥料效应不同,这造成不同连作年限外源磷肥的转化效应在土体中进行了不同的表征。另外,本研究中 2 种土壤类型均为典型石灰性土壤,理论上存在碳酸钙对磷素固定现象,使钙磷有效性降低。有研究表明,当土壤磷素负荷超过一定的临界点,磷的释放能力将迅速增加,产生磷素在土体中的垂直迁移[26-28,14],且 Eghball 等[29]认为外源化肥在土壤中的迁移距离为 1.1 m,一旦超过,将进入其他循环中,磷素向下累积,超过农作物的需求水平,下层土壤对迁移的磷素具有很强的吸附能力[29]。本研究中,虽然土壤速效磷含量< 57 mg/kg,各分级磷在土体中垂直迁移性较小,但外源磷肥残余量较大,有部分成为结合态磷,有部分成为潜在磷源,且活性很低的 Ca_{10}-P 与 O-P 在土体下层呈现底聚趋势,磷素活化系数<2%,磷素表观利用率<5%,被利用的肥料磷只占到施用磷肥的 15%左右,且磷肥一次性以基肥形式施入。Djodjic 等研究表明,即使土壤固磷能力未达到饱和,若土壤中存在大孔隙,水溶性磷与吸附磷也会向下移[30],且磷肥后效较高[31],超过磷素利用的临界点,将使土壤磷极度不平衡,造成植物对磷的吸收发生紊乱。说明本试验制种玉米连作恒量施磷水平条件下,全磷很难转化为速效磷,其有效性不高[29],在土壤中形成残留,并向下积累,超过农作物的需求水平,土壤中磷素负荷正在逐渐加重,形成土壤磷空间分布不均状态,使磷肥的空间有效性降低,从而造成植物磷素吸收紊乱,极有可能进入其它循环。恒量施磷是制种区长期制种玉米生产过程中一种保护产地稳定的政策,但其磷肥施用量远远超过农田植物获取经济产量实际所需要磷素水平,具有极大的潜在环境威胁性,其模式不利于生产区土壤磷素的合理循环与利用,增加了磷素离开土体,向水体或生态环境中迁移的可能,必将使生产区面临巨大面源污染,导致相应的生态环境隐患。同时,磷素过量施用又会引起作物早熟,诱发土壤缺锌,缺钼,有害重金属如镉元素的富集[8],使土壤碱性加重,理化性状恶化。在今后的制种生产过程中,本区制种田磷素施用应减量或基本停止施用,进一步研究如何有效转化土壤中残余磷素。

3.3 衡量施肥模式 2 种不同土类磷素动态变化特征

石灰性潮土与灌漠土上定位施用磷肥,无论是分级磷含量还是分级磷在不同土层变化趋势间均存在一定的差异性,从产量水平可以看出,灌漠土生产力较潮土高,从磷素的分级积累看,Ca_8-P 在潮土中移动性较灌漠土中强,灌漠土 Ca_{10}-P 达到最高年限较潮土中早,潮土中除 HRO-P 外其他有机磷均向下移动性增加,2 种不同土类磷素的移动性特征及磷素含量高低可能与土壤本身的肥力特征、水文运动特性及与地下水相连有关。研究表明,土壤水分条件与土壤中各个形态磷的相对含量有关,随着水分的增加和还原作用的加强,会对土壤磷的吸附发生改变[32-33]。灌漠土发自于漠土纲,水分条件较差,在后期灌耕过程中,肥力逐渐增加,而潮土多源发于较低湿洼且地下水位较高的地方,水分动态较灌漠土活跃,因此其磷素运移特性较灌漠土更明显,磷素的累积量也较灌漠土中明显,但水文动态特性增加了磷素向土体下部迁移且进入水体及其他生态环境的危险性,潮土中磷素的施用更应该关注磷素的累积问题。

4 结 论

制种玉米连作恒量施磷 8 a 土体含磷量增加。2 种不同农业土壤,除 Ca_2-P 下降外,其他总磷及各分级磷均不同程度增加。Ca_{10}-P 及 MLO-P 含量最高,增加量最大,O-P 及 LO-P 相对含量最低。总磷转化率低,磷素在土体中移动性较小,磷肥表观利用率小于 5%,磷素活化系数<2%,外源输入磷肥以 174.16 kg/(hm^2 · a)量残余在土壤中,大部分磷以低溶解态形式聚积在土壤表层。但随连作年限增加,表层土壤对磷素特别对钙磷及有机磷的固持及转化率下降,赋存容量下降,呈现底聚趋势,对生态环境健康存在极

大威胁,应减量或停止施磷。潮土磷肥施用需更加精细化。

致谢:本研究在实施过程中,受秋乐种业生产部经理鲁银国大力支持,在土样采集与管理过程受中天种业的大力支持,在此表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

[1] 夏立忠,Roy Anderson.长期施用牛粪条件下草原土壤磷的等温吸附与解吸动力学[J].土壤,2000,32(3):160-164.

[2] 刘建玲,李仁岗,廖文华.白菜—辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究[J].中国农业科学,2005,38(8),1616-1620.

[3] Shen Jianbo, Yuan Lixing, Zhang Junliang, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011,156:997-1005.

[4] 鲁如坤,时正元,施建平.我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J].中国农业科学,2000,33(2):63-67.

[5] 李书田,金继运.中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J].中国农业科学,2011,44(20):4207-4229.

[6] 刘建玲,张福锁.小麦—玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化(Ⅱ):土壤 Olsen-P 及各种形态无机磷的动态变化[J].应用生态学报,2000,11(3):360-364.

[7] 韩晓日,马玲玲,王晔青,等.长期定位施肥对壤无机磷形态及剖面分布的影响[J].水土保持学报,2007,21(4)51-55,144.

[8] 赵芸晨,秦加海,肖占文,等.长期定点施肥对制种玉米土壤理化性状及重金属含量的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):204-208.

[9] 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.

[10] 蒋柏藩,顾益初.石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J].中国农业科学,1989,22(3):58-66.

[11] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978,125(2):95-101.

[12] 黄欣欣,廖文华,刘建玲,等.长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J].土壤学报,2016,53(3):779-789.

[13] 陈新,梁成华,张恩平,等.长期定位施肥对蔬菜保护地土壤磷素空间分布的影响[J].中国农学通报,2005,21(12):209-213.

[14] 王月立,张翠翠,马强,等.不同施肥处理对潮棕壤剖面磷素累积与分布的影响[J].土壤学报,2013,50(4):135-142.

[15] 宋永林,李小平.长期施肥对作物氮磷利用及土壤速效氮磷供应能力的影响[J].磷肥与复肥,2008,23(2):71-78.

[16] 郑顺安,郑向群,张铁亮,等.石灰性紫色土上磷肥老化过程中土壤 Olsen-P 的变化特征及其模拟[J].环境化学,2012,31(9):1454-1455.

[17] 裴瑞娜,杨生茂,徐明岗,等.长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J].中国农业科学,2010,43(19):4008-4015.

[18] 史瑞和,邱嘉璋,陈帮本.江苏省几种主要土壤磷素供应状况和磷肥效果[J].土壤学报,1962(4):374-379.

[19] 顾益初,蒋柏藩,鲁如坤.风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响[J].土壤学报,1984,21(2):134-143.

[20] 冯固,杨茂秋,白灯莎.^{32}P 示踪研究磷素在石灰性土壤中形态及有效性变化[J].土壤学报,1996,33(3):301-307.

[21] 李中阳,李菊梅,徐明岗,等.长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J].土壤通报,2010,41(6):1434-1439.

[22] 蒋柏藩,沈仁芳.土壤无机磷分级的研究[J].土壤学进展,1990,18(1):1-8.

[23] 王艳玲,何园球,吴洪生,等.长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析[J].土壤学报,2010,47(5):880-887.

[24] 孙宁科,李隆,索东让,等.河西农田磷钾养分平衡及肥料利用率长期定位研究[J].土壤,2013,45(6):1009-1016.

[25] 金亮,周健民,王火焰,等.石灰性土壤肥际磷酸二铵的转化与肥料磷的迁移[J].磷肥与复肥,2008,23(5):14-18.

[26] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al., Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentration in the Broad balk experiment[J]. Journal of Environmental Quality, 1995,24(5):904-910.

[27] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000,29(1):105-110.

[28] Eghball B, Binford G D, Baltensperger D D. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application[J]. Journal of Environmental Quality, 1996,25(6):1339-1343.

[29] 李学敏,张劲苗.河北潮土磷素状态的研究[J].土壤通报,1994,25(6):259-260.

[30] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L, Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(2):678-684.

[31] 王立春.充分发挥磷肥后效作用是实现玉米节本增效的重要举措[J].玉米科学,2004(S2):91-94.

[32] De Mello J W V, Barron V, Torrent J. Phosphorus and iron mobilization in flooded soils from Brazil[J]. Soil Science, 1998,163(2):122-132.

[33] Miller A J, Schuur E A G, Chadwick O A. Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils[J]. Geoderma, 2001,102(3):219-237.