植物营养与肥料学报 2012,18(4):803-812
Plant Nutrition and Fertilizer Science

小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异

王小春,杨文钰*,任万军,邓小燕,张 群,向达兵,雍太文
(农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川农业大学农学院,四川温江 611130)

摘要:分别在四川2个玉米主产区—川中丘区射洪县和川西山区雅安市,采用单因素随机区组设计,通过3年田间试验对比研究了小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作模式下玉米产量、养分吸收积累规律以及与耕层土壤养分的关系。结果表明,两种套作模式经过一年种植后,小麦/玉米/大豆套作模式下玉米产量均高于小麦/玉米/甘薯套作模式下的玉米产量,但差异不显著,第二、三年分带轮作后,小麦/玉米/大豆套作模式下玉米产量显著高于小麦/玉米/甘薯套作模式下的玉米产量,二年平均分别高出679.5 kg/hm^{2}和839.1 kg/hm^2,增产9.4%和12.6%,射洪试验点增产作用较雅安试验点显著;分带轮作后两种套作体系玉米氮素吸收积累在拔节前差异不显著,拔节后小麦/玉米/大豆套作模式下玉米氮素积累量显著高于小麦/玉米/甘薯套作模式,磷的吸收积累则相反,从拔节期到开花期,小麦/玉米/大豆套作模式下玉米磷的吸收积累均显著低于小麦/玉米/甘薯套作模式,小麦/玉米/大豆套作模式下玉米钾素吸收积累量高于小麦/玉米/甘薯套作模式;不同作物带耕层土壤养分含量差异达显著水平,2个试验点大豆带残留的硝态氮、速效氮、速效钾平均分别比甘薯带高18.4%、24.1%、6.0%,而铵态氮和速效磷甘薯带较大豆带分别高18.9%和17.1%,两种套作模式中玉米带耕层土壤养分含量差异不显著,经第二、三年分带轮作后,耕层土壤养分含量差异减小,表明分带轮作玉米能较好均衡田间养分。

关键词:小麦/玉米/大豆(甘薯);玉米;产量;养分吸收
中图分类号:S513.01;S344.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)04-0803-10

Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay intercropping systems

WANG Xiao-chun, YANG Wen-yu*, REN Wan-jun, DENG Xiao-yan, ZHANG Qun, XIANG Da-bing, YONG Tai-wen
(*Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture/College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China*)

Abstract: To analyze and compare the differences of maize yields, nutrient absorptions and soil nutrients of the cultivated layers between the intercropping systems, wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato, a three-year field experiment designed with single-factor at random was conducted in two main maize producing areas in Sichuan, Shehong in the middle and Ya'an in the west. The results show that after one-year planting in the intercropping systems, the maize yields of the wheat/maize/soybean are higher than those of the wheat/maize/sweet potato; however, the differences are not significant. After two or three-year's strip rotation, the maize yields of the wheat/maize/soybean are considerably higher than those of the wheat/maize/sweet potato. The two year's productions are more than those of the previous year with 679.5 kg/ha and 839.1 kg/ha on average and with the increases of 9.4% and 12.6% in the two study areas, which reflects a more significant productivity in Shehong

收稿日期:2011-11-08　　**接受日期**:2012-03-05
基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201103001);国家重点基础研究发展计划"973计划"项目(2011CB100400);国家大豆产业技术体系专项(CARS-04-PS19)资助。
作者简介:王小春(1973—),女,四川罗江人,硕士,副教授,主要从事耕作制度与玉米栽培技术研究。E-mail:xchwang@sicau.edu.cn
*通讯作者 Tel:0835-2882004, E-mail:wenyu.yang@263.net

than that in Ya'an. In general, the uptakes and accumulations of nitrogen of maize are insignificant in the two intercropping systems after the strip rotation before the jointing stage of maize; however, they are significantly higher in the wheat/maize/soybean after the jointing stage of maize. The uptakes and accumulations of phosphorus in the wheat/maize/soybean are lower than those in the wheat/maize/sweet potato significantly, while, the uptakes and accumulations of potassium in the wheat/maize/soybean are higher than those in the wheat/maize/sweet potato from the jointing stage to the flowering stage. The contents of soil nutrients in different crop strips are varied greatly. The residuals of nitrate nitrogen, available nitrogen and available potassium in the soybean strip are higher than those in the sweet potato strip, with increases of 18.4%, 24.1% and 6.0%; however, the residuals of ammonium nitrogen and available phosphorus in the sweet potato strip are higher than those in the soybean strip, with increases of 18.9% and 17.1%. The contents of soil nutrients in the maize strip are insignificant after two and three-year's strip rotation, and the differences of soil nutrients in cultivated soil layers become small, which indicates that maize can balance the field nutrients better by the strip rotation.

Key words: wheat/maize/soybean (sweet potato); maize; yield; nutrient absorption

间套作复种是我国提高粮食作物播种面积增加粮食总产、保证粮食安全的重要途径。套作模式通过调整作物共生时间和共生方式,有效利用光热水肥及土地资源,既实现主产作物增产,又多收一季粮食[1]。西南地区由于光热水资源丰富,以多熟套作种植为主,小麦/玉米/甘薯和小麦/玉米/大豆三熟套作是其主要种植模式,占西南旱地玉米生产的70%以上[2]。雍太文等人对两种套作模式养分吸收利用研究认为:两种模式均存在氮素种间竞争促进作用和氮素转移,小麦/玉米/大豆较小麦/玉米/甘薯套作更有利于肥料氮的吸收、土壤肥力的保持和周年作物的可持续生产;对两种套作模式下小麦氮素吸收利用研究得出:与小麦/玉米/甘薯套作模式相比,小麦/玉米/大豆套作降低了开花期和成熟期小麦生长区的土壤湿度、pH值及 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的含量,提高了小麦植株地上部总吸氮量及土壤总氮含量[3-6]。两种套作体系中对玉米的影响尚未曾报道。

小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯两种套作体系中核心作物—玉米,是西南地区重要的粮食作物,常年播种面积达470万公顷,是我国第三大玉米主产区,平均产量较全国低300 kg/hm^2 左右,年缺口1500万吨,如何提高单产、增加玉米总量是缓解该区玉米供需矛盾的重要途径。间套模式由于作物搭配不同存在着种间促进或抑制作用[1,3-8],两种套作体系差异源于玉米分别与非豆作物甘薯和豆科作物大豆的套作,套作后对玉米产量、养分吸收利用及土壤养分含量的影响如何还鲜有报道。本文针对西南地区旱地主要两种套作模式,在传统种植方式基础上,采用分带轮作,即,第二年玉米带换茬种小麦,大豆和甘薯带接茬种玉米,通过比较两种模式下玉米产量,玉米养分吸收利用和耕层土壤养分含量的差异,分析了玉米氮、磷、钾利用和耕层土壤养分累积的关系,讨论了西南地区提高玉米产量、养分吸收和两种模式下协调养分的途径,对于制定西南旱地理想的农田生态系统养分管理策略和两种套作模式下玉米科学施肥技术具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验点状况

供试的小麦(*Triticum aestivum*)品种为内麦9号(四川省内江市农业科学所)、玉米(*Zea mays*)川单418(四川农业大学玉米所)、大豆(*Glycine max*)贡选1号(四川省自贡市农业科学研究所)、甘薯(*Ipomoea batatas*)川薯164(四川省农业科学院作物研究所)。

试验在2008~2011年进行,试验地分别位于四川两个玉米主栽区:川西山区—四川农业大学雅安农场(29°98′N,103°0′E)和川中丘陵区—射洪县瞿河乡新华村(30°87′N,105°38′E)。两个试验点气候均属亚热带湿润季风气候区。雅安年均温16.2℃,日照1005~1200 h,年降水量1250~1750 mm;射洪年平均气温17.2℃,日照1307~1472 h,年降水量908~993 mm;两地土壤类型均为紫色土,质地雅安为重壤土,射洪为中壤土,试验前土壤的养分状况见表1。

表 1　试验前土壤基础肥力状况

Table 1　Basic fertility conditions of soils before the experiment

试验地点 Experimental site	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效氮 Avail. K (mg/kg)	速效磷 Avail. K (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
雅安 Ya'an	7.4	27.86	1.79	0.89	29.76	115.88	37.85	136.61
射洪 Shehong	7.8	17.33	0.87	1.09	30.07	62.50	26.90	164.30

1.2　试验设计

2008～2009 年,在雅安和射洪两个试验点采用单因素设计,两种套作种植模式为小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯(种植模式如图 1)。采用 1 m/1 m田间配置,玉米每带种2行,带长5米,每小区 10 带,小区面积100 m^2,密度52500 株/hm^2,穴植双株,窝距 38 cm。全生育期玉米共施氮肥 N 240 kg/hm^2,按基肥∶穗肥 =5∶5 施用,底肥配施猪粪水(含 N 0.18%、P_2O_5 0.12%、K_2O 0.08%)24000 kg/hm^2,过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)600 kg/hm^2,氯化钾(含 K_2O 60%)150 kg/hm^2。小麦田间管理控制一致;大豆每带种 3 行,种植密度为 135000 株/hm^2,行距 33.3 cm,穴距 33.4 cm,穴留 3 株,大豆基肥施尿素 60 kg/hm^2、过磷酸钙 450 kg/hm^2、氯化钾 60 kg/hm^2,追肥为初花期雨后撒施尿素 60 kg/hm^2;甘薯每带起单垄,垄宽 0.6 m,垄高 0.5 m,垄栽双行单株,行距 0.5 m、株距 0.17 m,施肥量与大豆相同。

2009～2010 年和 2010～2011 年分别在上一周期的基础上,分带轮作,即在玉米茬口播小麦,甘薯和大豆带改种玉米,次年再互换,栽培管理措施同 2008～2009 年。

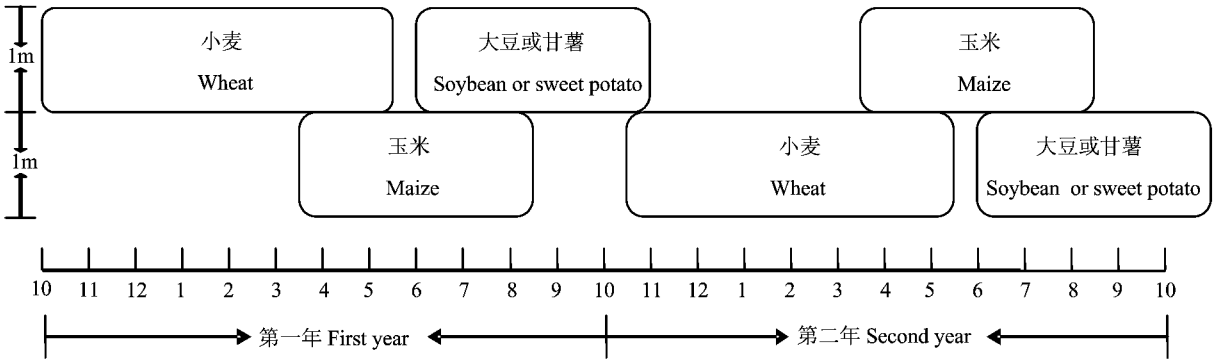

图 1　种植模式说明

Fig. 1　The illustration and description of the cropping patterns

[注(Note): 同一地块 10 月底带状间隔种植小麦 Planting wheat in the strip pattern in late of October,预留空幅 Reserving zone,4 月初于小麦生长后期套种玉米在空幅内 Planting maize in the empty zone in spring in the late growing stages of wheat in early of April,5 月中下旬收获小麦 Wheat is harvested in middle of May,6 月上旬在小麦茬口上套种大豆或甘薯 Planting soybean or sweet potato in wheat stubble in early of June,玉米 8 月初收获 Harvesting maize in early of August, 10 月底收获大豆 Harvesting soybean in late of October. 第二年分带轮作 The strip rotation in the second year,即 That is: 小麦种在玉米行内 Planting wheat in maize row,大豆或甘薯行种玉米 Planting maize in soybean or sweet potato row.]

1.3　采样与测定方法

1.3.1 产量及产量构成因素　玉米收获时全区考察空秆数、双苞数、有效穗,每小区取有代表性的 20 穗考察穗长、穗粒数、千粒重、秃尖长,分小区单收单晒计产。

1.3.2 土壤样品的采集与测定　作物收获时在试验地分带采集土壤剖面样品(0—30 cm),按 S 型路线在同作物窄行间多点采样,制备混合样。所取土样除杂、混匀后,一部分制备土壤鲜样,不能及时测定的土样冰冻保存,一部分风干备用。

土样含水量测定用烘干法;称取 5.00 g 鲜土置于振荡瓶中,加入 1 mol /L KCl 溶液 50 mL,置于恒

温气浴摇床(thermo forma orbital shaker)在振速120 r/min下,振荡60 min后,过滤,取滤液置于塑料瓶中,4℃冷藏,在1周内用ALLIANCE INTEGRAL Futura连续流动分析仪测定浸提液中的NH_4^+-N和NO_3^--N含量;土壤全氮采用凯氏定氮法;全磷采用钼锑比色法;全钾采用火焰光度法;碱解氮采用碱解扩散法;有效磷采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度法;土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定。

1.3.3 玉米植株样品的采集和养分含量的测定 试验于四叶期每小区选择长势一致的植株挂牌标记,分别在四叶期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期、蜡熟期、成熟期取玉米5株,采集地上部分,在105℃烘箱中杀青60 min,然后在80℃条件下烘至恒重,称重,计干物质累积量。将各生育时期采集的样品烘干、粉碎,用浓H_2SO_4-H_2O_2消煮,采用凯氏定氮法测氮、钒钼黄比色法测磷、原子吸收法测钾。

1.4 数据处理

使用SPSS16.0软件进行统计分析,LSD法进行显著性测验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 玉米产量

2.1.1 两种套作模式下玉米产量的差异 两种套作模式下玉米籽粒产量差异(表2)结果表明,两个试验点小麦/玉米/大豆模式下玉米产量分别较小麦/玉米/甘薯模式高185.1 kg/hm^{2}和223.4 kg/hm^2,增产2.4%和3.2%,但差异均未达显著水平,表明玉米/大豆套作由于种间促进作用,有利于玉米产量的提高,但增产效果不显著;产量构成因素和穗部性状中,除玉米穗粒数表现为雅安试验点小麦/玉米/大豆模式显著高于小麦/玉米/甘薯模式外,其余各指标在两种模式下差异均不显著,但总体表现为小麦/玉米/大豆模式下玉米穗长和千粒重均有所增加,而秃尖长降低。

表2 两种套作模式下玉米产量及产量构成因素、穗部性状的差异(2008～2009)

Table 2 The differences of yields, yield components and ear traits of maize in the two intercropping systems

试验地点 Experimental site	处理 Treat.	穗长 Ear length (cm)	秃尖长 Bald length (cm)	有效穗 Ear numbers (No./hm^2)	穗粒数 Kernels per ear (No./ear)	千粒重 1000-kernel wt. (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
雅安	A	18.7 a	0.65 a	48335.7 a	590.9 a	274.6 a	7842.6 a
Ya'an	B	18.4 a	0.68 a	48502.2 a	579.2 b	272.6 a	7657.5 a
射洪	A	18.5 a	2.18 a	48502.2 a	555.3 a	264.6 a	7127.0 a
Shehong	B	18.4 a	2.21 a	47835.5 a	547.3 a	263.7 a	6903.6 a

注(Note): A—小麦/玉米/大豆套作 Wheat/maize/soybean system; B—小麦/玉米/甘薯套作 Wheat/maize/sweet potato system. 数据为三个重复的平均数 Data are the averages of three replicates. 同列数据后不同字母表示同一试验点处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different between treatments in the same experimental site at the 5% level.

2.1.2 分带轮作后玉米产量的差异 不同前茬条件下,两个试验点两年玉米平均产量差异均达显著水平(表3)。大豆前茬玉米产量显著高于甘薯前茬,2010年雅安和射洪试验点大豆前茬玉米产量分别比甘薯前茬高出404.7 kg/hm^{2}和954.3 kg/hm^2,增产5.5%和13.3%,2011年表现为雅安和射洪试验点大豆前茬玉米产量分别比甘薯前茬高出688.1 kg/hm^{2}和990.0 kg/hm^2,增产9.4%和15.7%。产量构成因素中,有效穗、千粒重在两年试验结果中处理间均不显著,而穗粒数处理间均达显著水平,大豆前茬玉米穗粒数显著高于甘薯前茬,2010年雅安和射洪试验点大豆前茬玉米穗粒数分别比甘薯前茬高出20.9粒/穗、39.9粒/穗,2011年表现为雅安和射洪试验点大豆前茬玉米穗粒数分别比甘薯前茬高出34.1粒/穗、41.1粒/穗,表明不同前茬对玉米穗粒数的形成影响较大,最终导致产量差异。秃尖长和穗长各处理间总体表现为大豆前茬玉米秃尖长低于甘薯前茬,穗长高于甘薯前茬,2010年射洪试验点和2011年雅安试验点各处理间差异均达显著水平。

表 3　不同前茬下玉米产量及产量构成因素、穗部性状的差异

Table 3　The differences of yields, yield components and ear traits of maize under different preceding crops

年份 Year	试验地点 Exper. site	前茬作物 Preceding crops	穗长 Ear length (cm)	秃尖长 Bald length (cm)	有效穗 Ear numbers (No./hm^2)	穗粒数 Kernels per ear (No./ear)	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
2010	雅安	大豆 Soybean	17.3 a	0.95 a	50669 a	543.9 a	283.4 a	7811.0 a
	Ya'an	甘薯 Sweet potato	16.6 a	0.85 a	50669 a	523.0 b	279.5 a	7406.3 b
	射洪	大豆 Soybean	18.8 a	0.77 b	51168 a	582.0 a	273.9 a	8155.7 a
	Shehong	甘薯 Sweet potato	18.0 b	1.48 a	49169 a	542.1 b	270.2 a	7201.4 b
2011	雅安	大豆 Soybean	17.7 a	0.95 b	49169 a	570.5 a	284.4 a	7979.4 a
	Ya'an	甘薯 Sweet potato	16.6 b	1.15 a	49169 a	536.4 b	276.5 a	7291.3 b
	射洪	大豆 Soybean	16.5 a	1.22 a	481689 a	553.4 a	274.2 a	7308.9 a
	Shehong	甘薯 Sweet potato	15.9 a	1.41 a	46169 a	512.3 b	267.2 a	6318.8 b

注(Note): 数据为三个重复的平均数 Data are the averages of three replicates. 同列数据后不同字母表示同一年同一试验点处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different between treatments in a experimental site for the same year at the 5% level.

2.2　分带轮作后玉米养分吸收的差异

玉米对养分的吸收积累具有阶段性[9-10]。不同前茬下,两年的玉米植株氮素吸收积累量平均值雅安试验点在生长前期(四叶期~大喇叭期)差异不显著,从开花期开始,玉米植株氮素的吸收积累量均表现为大豆前茬显著高于甘薯前茬。而射洪试验点从大喇叭口期就表现较大差异(图 2A),到成熟期,两个试验点大豆前茬玉米植株氮素积累量分别高出甘薯前茬 22.59 kg/hm^2 和 19.73 kg/hm^2,增加 12.9% 和 10.8%,射洪试验点各取样时期植株氮素吸收积累量较雅安试验点低。

不同前茬下,玉米植株磷素吸收积累量雅安试验点在生长前期(开花期前)差异达显著水平,表现为大豆前茬低于甘薯前茬,从开花期开始,玉米植株磷素的吸收积累量差异不显著,而射洪试验点在大喇叭口期前表现出较大差异(图 2B)。2 个试验点,甘薯前茬玉米植株磷素吸收积累量分别高出大豆前作 6.95 kg/hm^2 和 5.56 kg/hm^2,增加 9.8% 和 7.5%。

玉米植株钾的吸收积累量两试验点各取样时期均表现为大豆前茬高于甘薯前茬,到成熟期,两个试验点大豆前茬玉米植株钾素吸收积累量分别高出甘薯前茬 16.65 kg/hm^2 和 21.05 kg/hm^2,增加 10.6% 和 13.6%。射洪试验点各取样时期植株钾素吸收积累量较雅安试验点高,这可能与射洪土壤中较高的钾素养分含量有关(图 2C)。

2.3　两种套作模式不同作物带耕层土壤养分的差异

2.3.1 二种套作模式不同作物带土壤养分含量　对 2008 ~ 2009 年试验的土壤样品进行分析测试,结果(表 4)表明,经过一年种植后,小麦—大豆带、小麦—甘薯带和玉米带土壤铵态氮、硝态氮、速效氮、速效磷和速效钾差异均达显著水平($P < 0.05$),二种套作体系中玉米带土壤养分各指标差异均不显著。两个试验点的土壤铵态氮含量均表现为甘薯带显著高于其他作物带,玉米带次之,大豆带最低。甘薯带平均分别较玉米带和大豆带高 11.3% 和 18.9%,两种套作模式下的玉米带土壤耕层铵态氮的含量差异不显著,但两个试验点均表现为小麦/玉米/大豆套作模式中玉米铵态氮的含量略高于小麦/玉米/甘薯套作模式,且雅安试验点玉米带累积铵态氮的量平均较射洪试验点高 94.9%,这可能与两个试验点的土壤肥力状况有关。耕层土壤硝态氮含量为大豆带显著高于其它作物带,较玉米带高 28.4%,较甘薯带高 18.5%,甘薯带显著高于玉米带。玉米带硝态氮的累积量表现为小麦/玉米/大豆套作模式中略低于小麦/玉米/甘薯套作模式,但二者差异不显著。两个试验点玉米带硝态氮的积累量与铵态氮一致,雅安试验点高于射洪试验点。

土壤全氮、全磷、全钾在各作物带的累积,除

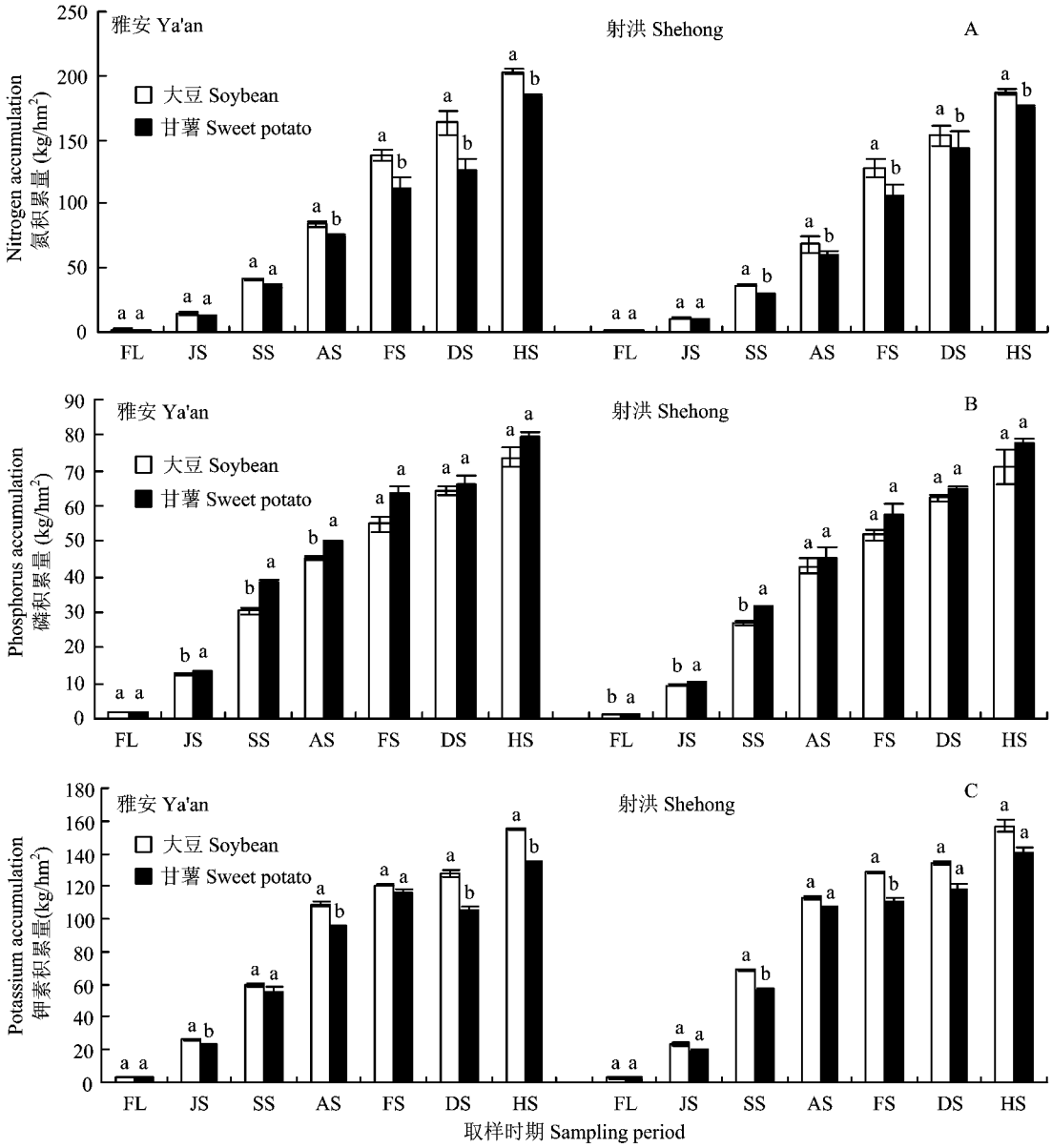

图2 不同前茬作物对玉米氮、磷、钾素积累的影响

Fig. 2 N, P and K accumulation of maize under different preceding crops

[注(Note): FL—四叶期 4th leaf stage; JS—拔节期 Jointing stage; SS—大喇叭口期 Spike formation stage; AS—开花期 Anthesis stage; FS—灌浆期 Filling stage; DS—蜡熟期 Dough stage; HS—收获期 Harvest stage. 图中数据为2009～2010年和2010～2011年平均值 Values in the figure represent means of 2009-2010 and 2010-2011. 柱上不同小写字母表示前茬作物处理间差异达5%显著水平 Different small letters above the bars mean significant between treatments of preceding crops at the 5% level.]

雅安试验点甘薯带的全氮含量显著低于大豆、玉米带外,其它各指标差异均未达显著水平。速效氮的累积量表现为大豆带 > 玉米带 > 甘薯带,雅安试验点大豆带比甘薯带高 18.4%,比射洪试验点高 29.9%,在两种套作模式下玉米带速效氮累积量差异不显著。大豆带速效磷的积累量显著低于其他作物带,分别较甘薯带和玉米行带低 2.49 mg/kg 和 2.99 mg/kg。速效钾的含量玉米带显著高于大豆带和甘薯带,表明大豆和甘薯对钾的吸收量均较多,二者相比,大豆带的耕层土壤含钾量略高于甘薯带。

2.3.2 轮作玉米对不同茬口耕层土壤养分含量的影响 如2.3.1所述,不同作物带造成土壤肥力的差异显著,通过分带轮作种植玉米后,不同前茬作物带间土壤养分差异减小(表5)。2010年试验中,土壤各养分的积累量除铵态氮、速效氮和速效磷两个试验点差异显著外,其它各指标差异均不显著。

表 4　二种套作模式不同作物带土壤养分含量(2008～2009)

Table 4　Soil nutrient contents in different crop strips under the two relay intercropping patterns

试验地点 Exper. site	作物带 Crop strip	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
雅安 Ya'an	大豆 Soybean	10.95 c	15.99 a	31.21 a	1.82 a	0.91 a	29.48 a	127.40 a	32.85 b	135.18 a
	玉米 Maize	12.05 b	13.08 c	29.63 a	1.77 a	0.83 a	28.29 a	115.85 b	36.46 a	139.95 a
	甘薯 Sweet potato	12.75 a	13.45 b	29.20 a	1.54 b	0.89 a	29.31 a	107.62 c	35.34 a	128.61 b
	玉米 Maize	11.36 b	13.53 c	30.51 a	1.65 a	0.81 a	27.31 a	117.25 b	35.21 a	134.75 a
射洪 Shehong	大豆 Soybean	5.63 b	14.89 a	18.67 a	0.68 a	0.89 a	30.07 a	72.10 a	26.61 b	140.26 b
	玉米 Maize	6.25 b	10.45 c	17.45 a	0.66 a	0.79 a	26.53 b	67.45 b	29.85 a	153.74 a
	甘薯 Sweet potato	6.83 a	12.62 b	16.91 a	0.59 a	0.90 a	30.92 a	55.50 c	33.71 a	131.16 b
	玉米 Maize	5.76 b	11.36 c	17.32 a	0.63 a	0.75 a	26.53 b	65.45 b	31.62 a	157.24 a

注(Note)：同列数据后不同小写字母表示同一试验点处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different between treatments in a experimental site at the 5% level.

表 5　不同茬口轮作玉米后耕层土壤养分含量比较

Table 5　Soil nutrient contents under different preceding crops after maize harvesting

年份 Year	试验地点 Exper. site	前茬 Preceding crop	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
2010	雅安	大豆 Soybean	10.32 b	11.45 a	29.43 a	1.71 a	0.77 a	25.93 a	114.46 a	35.55 a	130.05 a
	Ya'an	甘薯 Sweet potato	12.45 a	10.21 a	28.48 a	1.62 a	0.79 a	23.92 a	109.63 b	36.51 a	121.51 a
	射洪	大豆 Soybean	8.78 a	7.78 a	15.34 a	0.72 a	0.87 a	29.70 a	59.44 a	29.22 b	127.95 a
	Shehong	甘薯 Sweet potato	9.56 a	6.67 a	14.50 a	0.64 a	0.80 a	27.82 a	57.82 a	32.16 a	136.58 a
2011	雅安	大豆 Soybean	9.87 b	8.67 a	30.32 a	1.83 a	0.74 a	27.81 a	106.62 a	36.67 a	122.65 a
	Ya'an	甘薯 Sweet potato	11.25 a	7.81 a	28.57 a	1.79 a	0.76 a	26.72 a	101.23 a	36.51 a	118.67 a
	射洪	大豆 Soybean	8.32 b	5.38 a	16.78 a	0.71 a	0.82 a	31.65 a	51.14 a	28.97 a	126.53 a
	Shehong	甘薯 Sweet potato	10.06 a	4.97 a	15.70 a	0.74 a	0.78 a	28.62 a	49.31 a	30.19 a	131.21 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示同一年同一试验点处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different between treatments in a experimental site for the same year at the 5% level.

土壤铵态氮的积累量两种前茬相比,在雅安试验点大豆前茬的玉米带显著低于甘薯前茬,射洪试验点前茬的影响差异不显著。雅安试验点耕层土壤速效氮的含量大豆前茬显著高于甘薯前茬,高4.4%,射洪试验点处理间差异不显著。射洪试验点速效磷的含量在两个处理间差异达显著水平,甘薯前茬较大豆前茬高2.94 mg/kg,为9.1%。雅安试验点处理间差异不显著。2011年的试验结果与2010年大致一致,除土壤铵态氮的积累量甘薯前茬显著高于大豆外,其余各指标差异均不显著。由此可见,虽然前茬不同,对耕层土壤各养分的含量造成了较大的影响,但种植一季玉米后,土壤中各养分的积累量差异不大,表明玉米对养分的吸收有较好的均衡作用,主要表现在对硝态氮、速效氮、速效磷等养分的均衡吸收上。

2.4 玉米养分吸收量与土壤养分的关系

播种前土壤肥力状况、收获后土壤养分残留量与玉米的养分积累量的相关分析结果(表6)表明,玉米植株氮积累量与播种前土壤硝态氮含量呈极显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数高达0.99,与速效氮的含量相关系数也较高为0.86。

植株磷、钾的积累量分别与速效磷、钾存在显著的正相关关系,相关系数分别为0.91、0.94。分析收获后土壤养分残留量与玉米氮、磷、钾的吸收积累量的相关关系,发现除土壤铵态氮与玉米磷的吸收积累量显著外,其余均不显著。因此,由相关分析结果可知,玉米能有效地协调甘薯与大豆带土壤肥力,养分盈余量减少,主要影响因素是玉米在不同土壤条件下对养分的吸收利用差异。玉米生长过程中,土壤中易流失的硝态氮和速效氮、磷、钾与玉米养分吸收利用的相关系数均较高,使作物吸收利用养分量与土壤养分的残留量没有显著相关关系。

表6 播种前土壤肥力、收获后养分含量与玉米养分积累的关系

Table 6 The relationship between soil fertility before sowing, nutrient content and nutrient uptake and accumulation of maize

播种前土壤养分 Soil nutrient content before sowing	玉米养分积累量 Nutrient accumulation by maize			收获后土壤养分残留 Soil nutrient content after harvest	玉米养分积累量 Nutrient accumulation by maize		
	N	P	K		N	P	K
铵态氮 NH_4^+-N	0.07	0.56	-0.45	铵态氮 NH_4^+-N	0.49	0.83*	-0.33
硝态氮 NO_3^--N	0.99**	-0.74	0.83	硝态氮 NO_3^--N	-0.16	0	-0.58
有机质 OM	0.46	0.19	-0.05	有机质 OM	0.5	0.5	-0.37
全氮 Total N	0.47	0.17	-0.02	全氮 Total N	0.59	0.59	-0.29
全磷 Total N	0.32	-0.09	0.34	全磷 Total N	0.02	0.19	0.04
全钾 Total N	-0.56	0	-0.04	全钾 Total N	0.18	-0.2	0.45
速效氮 Available N	0.86	0.02	0.12	速效氮 Available N	0.43	0.49	-0.41
速效磷 Available P	-0.52	0.91*	-0.79	速效磷 Available P	0.45	0.6	-0.41
速效钾 Available K	0.71	-0.99**	0.94*	速效钾 Available K	-0.75	-0.53	-0.2

注(Note):** 表示0.01显著水平 Means 0.01 significant level; * 表示0.05显著水平 Means 0.05 significant level.

3 讨论

3.1 优化种植模式,提高玉米单产

大量研究表明,间套作由于作物结构不同,存在着种间竞争和协同作用。李隆等[8]、李玉英等[11]、肖焱波等[12]研究认为,豆科与大多数禾本科作物间套作时,豆科通过根瘤固氮及氮素转移等作用促进禾本科氮素吸收和生物产量增加,表现出禾本科的间套作优势,禾本科通过大量吸氮来刺激并提高豆科的根瘤固氮效率,缓解了间套作体系中豆科的劣势作用;而非豆科作物与禾本科套作,往往表现出较强的竞争作用。本研究表明:玉米在小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯二种套作系统中,由于种间竞争和协同作用,产量差异显著,与小麦/玉米/甘薯模式下玉米产量相比,通过分带轮作后小麦/玉米/大豆模式下玉米产量增幅在404.7~990.0 kg/hm^{2}之

间,尤其在土壤基础肥力低的丘陵山区增产显著。两种套作模式下玉米养分的吸收利用上存在一定差异,总体表现为玉米与大豆套作模式的玉米氮、钾的吸收利用都优于玉米与甘薯套作模式,这与 Morris 和 Garrity 的研究结果一致[13-14],原因在于两种套作系统种植一轮后,各作物带耕层土壤的养分含量差异较大,大豆带养分含量除铵态氮、速效磷的含量低于甘薯带外,其余各养分含量均高于甘薯带,这对分带轮作后玉米生长提供了足够的基础养分,有利于玉米生长发育和产量的形成。

小麦/玉米/甘薯是西南地区传统的三熟种植模式,对该区保障粮食安全起到重要作用,但由于膳食结构改变和规模化养猪对甘薯的需求量减少,再加上套作体系的三大作物均属高耗氮作物,地力肥力损失较大。本试验研究结果得出: 该模式下玉米产量和玉米养分吸收不及小麦/玉米/大豆模式,因此,优化种植模式,以大豆代替甘薯,是提高该区玉米产量的重要技术措施之一。

3.2　维持两种套作系统农田养分平衡,实现养分高效利用的策略探讨

采用适宜的种植模式是控制农田面源污染的首要环节。西南地区旱地采用的小麦/玉米/大豆与小麦/玉米/甘薯二种套作体系,通过多种作物搭配轮作大大提高了土壤养分的利用效率,有效控制了面源污染,特别是小麦/玉米/大豆套作能有效实现土地的用养结合和养分互补,具有明显的增产节肥优势[5-6]。但如何使这二种套作系统更优化,维持农田养分平衡,既能达到肥料的高效利用,又不至于长期种植后造成土壤的恶化? 本试验研究表明,除了带内轮作外,即小麦与甘薯、小麦与大豆,还应分带轮作,利用玉米的农田养分平衡效应,达到全田养分均衡的目的。再加上西南地区多以丘陵山地为主,水土流失严重,土壤中铵态氮、硝态氮及速效氮、磷、钾易随水流失,通过一季玉米的平衡后,还可高效利用养分。西南地区小麦播种时一般采用免耕直播,而玉米残茬影响小麦农事操作,因此就在收获了大豆和甘薯带内播小麦,要实现分带轮作有一定的难度,生产中可以采用玉米低留茬、小麦播种行错过玉米行等措施来解决。

发达国家在进行农田面源污染控制上,不仅要选择合适的种植模式,主要是在全流域范围内广泛推行农田最佳养分管理(best nutrient management practice,BNMP),进行源头控制,才能实现农业生产的高效与环境安全的双重目标[15-18]。本研究为了考察不同模式与作物的养分残留量,采用一致的施肥量,结果表明,在小麦/玉米/甘薯套作体系中,由于甘薯前作后土壤残留养分量少,玉米生长量相对较低,过多施肥,由于当季利用少,造成较多的养分盈余,因此,针对两种套作体系玉米施肥必须制定相适应的施肥方案,才能实现养分高效利用的目的。本研究得出,二个套作体系分带轮作后,氮肥都应重视穗肥的施用,在土壤肥力低的地块,玉米氮肥应在玉米生长中期即大喇叭口期早施、重施,磷肥应早施保证前期(开花前)玉米对磷的需求。西南区玉米生产中很不重视钾肥的施用,这与该区土壤高钾含量有关,采用农民习惯的施钾量,土壤钾素是亏缺的,因此,应适量增施钾肥,充分发挥钾肥的增产作用。具体的二种套作体系应如何科学施肥,还有待更进一步研究。

4　结论

1)两种套作模式下玉米产量差异显著。分带轮作后,小麦/玉米/大豆套作模式下玉米产量较小麦/玉米/甘薯套作模式下玉米产量增产在 404.7 ~ 990.0 kg/hm^{2}之间,特别对基础肥力较低的土壤增产效果更显著。

2)两种套作模式下玉米养分的吸收利用存在一定差异,总体表现为玉米与大豆套作玉米氮、钾的吸收利用都优于玉米与甘薯套作,磷则相反。

3)两种套作模式不同作物带土壤耕层养分差异较大,大豆带养分含量除铵态氮、速效磷的含量低于甘薯带外,其余各养分含量均高于甘薯带,有利于分带轮作后玉米的生长,并且通过玉米一季生长对不同前茬作物带养分有较好的均衡作用。

参 考 文 献:

[1] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1-8.
Yu C B, Sun J H, Li L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 1-8.

[2] 四川省统计局. 四川省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
Statistical Bureau of Sichuan Prorince. Sichuan statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistic Press, 2009.

[3] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170-3178.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al*. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting

systems[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(9): 3170-3178.

[4] 雍太文, 陈小容, 杨文钰, 等. 小麦/玉米/大豆三熟套作体系中小麦根系分泌特性及氮素吸收研究[J]. 作物学报, 2010, 36(3): 477-485.
Yong T W, Chen X R, Yang W Y *et al*. Root exudates and nitrogen uptake of wheat in wheat/maize/soybean relay cropping system[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(3): 477-485.

[5] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. "小麦/玉米/大豆"套作体系中不同作物间的相互作用及氮素的转移、吸收[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 320-326.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al*. The reciprocity and nitrogen transfer in inter-cropping and inter-planting system of "wheat/maize/soybean"[J]. J. Nucl. Agric. Sci., 2009, 23(2): 320-326.

[6] 雍太文, 杨文钰, 王小春, 等. 两种三熟套作体系中的氮素吸收利用及种间相互作用[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(2): 167-172.
Yong T W, Yang W Y, Wang X C *et al*. Study on the nitrogen uptake and utilization and interspecies reciprocity in the two relay-planting systems[J]. Sichuan Agric. Univ., 2009, 27(2): 167-172.

[7] 宁堂原, 焦念元, 李增嘉, 等. 施氮水平对不同种植制度下玉米氮利用及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2332-2336.
Ning T Y, Jiao N Y, LI Z J *et al*. Effects of N application rate on N utilization, yield and quality of maize under different cropping systems[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(12): 2332-2336.

[8] 李隆, 杨思存, 孙建好, 等. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 197-200.
Li L, Yang S C, Sun J H *et al*. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1999, 10(2): 197-200.

[9] 李潮海, 王群, 梅沛沛, 等. 不同质地土壤上玉米养分吸收和分配特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 561-568.
Li C H, Wang Q, Mei P P *et al*. Characteristics of nutrient absorption and distribution of maize under different soil textures[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 561-568.

[10] 高聚林, 王志刚, 孙继颖, 等. 青贮玉米对氮磷钾的吸收规律[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 363-368
Gao J L, Wang Z G, Sun J Y *et al*. Nitrogen, phosphorus and potassium absorption in ensilage maize[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(3): 363-368.

[11] 李玉英, 孙建好, 李春杰, 等. 施氮对蚕豆/玉米间作系统蚕豆农艺性状及结瘤特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3467-3474.
Li Y Y, Sun J H, Li C J *et al*. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on the agoronmic and nodulation characteristics of intercropped faba bean[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(10): 3467-3474.

[12] 肖焱波, 李隆, 张福锁, 等. 小麦-蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965-973.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S *et al*. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(5): 965-973.

[13] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water[J]. Field Crop Res., 1993, 34(3-4): 303-317.

[14] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients[J]. Field Crop Res., 1993, 34(3-4): 319-334.

[15] 李秋梅, 陈新平, 张福锁, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 152-156.
Li Q M, Chen X P, Zhang F S *et al*. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(2): 152-156.

[16] Song X Z, Zhao C X, Wang X L *et al*. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in Northern China[J]. Comptes Rends Biol., 2009, 332(4): 385-392.

[17] Wei Y P, Chen D L, Kelin H *et al*. Policy incentives for reducing nitrate leaching from intensive a culture in desert oases of Alxa, Inner Mongolia, China[J]. Agric. Water Manag., 2009, 96(7): 1114-1119.

[18] Riaz M, Mian I A, Malcolm S *et al*. Extent and causes of 3D spatial variations in potential N mineralization and the risk of ammonium and nitrate leaching from an N-impacted permanent grassland near York, UK[J]. Environ. Poll., 2008, 156(3): 1075-1082.