

# 不同栽培模式对氮磷钾养分径流流失的影响

何铁光, 秦芳, 苏天明, 苏利荣, 张野, 何永群, 李忠义, 胡钧铭, 谢丽萍

(广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007)

**摘要:**为了寻求提高肥料利用率、降低养分流失、减少环境污染的最佳种植模式,在广西丘陵坡耕地进行定位观测,研究广西主要经济作物、农民常规施肥和主要种植模式下的坡耕地养分径流流失特征,结果表明,木薯+玉米模式径流水中的总磷、总钾、硝态氮流失量最大,其次为总氮、铵态氮;木薯+花生模式径流水中的养分流失量除总磷( $245.1\text{ g/hm}^2$ )最多外,其他养分流失量均较少,氮素流失以硝态氮为主,占总氮的 50%以上。产生径流量最多的模式是木薯+花生为  $60\,974\text{ L/hm}^2$ ,其次是甘蔗模式为  $58\,583\text{ L/hm}^2$ ,最少的模式是木薯+玉米为  $52\,676\text{ L/hm}^2$ ;木薯+玉米种植模式下作物吸收氮、磷、钾的量最多(7 月 13 日),甘蔗吸收氮、磷、钾的量均是最多的(11 月 13 日)。三种种植模式中施肥量最大的是木薯+玉米,其次是木薯+花生,甘蔗是最少的。养分氮、磷径流率最大的均为甘蔗单种模式,养分钾径流率最大的为木薯+玉米种植模式。

**关键词:**玉米; 种植模式; 养分; 径流

**中图分类号:**S152.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)01-0095-05

## Effect of Different Cultivation Methods on Nitrogen and Phosphorus Losses along with Runoff

HE Tie-guang, QIN Fang, SU Tian-ming, SU Li-rong, ZHANG Ye,

HE Yong-qun, LI Zhong-yi, HU Jun-ming, XIE Li-ping

(Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** In order to optimize cropping pattern of increasing fertilizer use efficiency, decrease nutrient loss and reduce environmental pollution, the field experiment was conducted to study the characteristics of slope farmland nutrient losses along with runoff in the main cash crop fields under the conventional fertilization practiced by farmers and major cropping patterns in Guangxi hilly sloping land. The results showed that loss amount of total phosphorus, total potassium and nitrate were maximum in cassava+maize mode, followed by loss amount of total nitrogen, ammonium nitrogen. The loss amount of the remaining nutrients was less except for the total phosphorus ( $245.1\text{ g/hm}^2$ ), and the loss of nitrate nitrogen was the main loss form of nitrogen, which accounted for more than 50% of the total lost nitrogen. The maximum runoff was  $60\,974\text{ L/hm}^2$  in the cassava+peanut model, the next was  $58\,583\text{ L/hm}^2$  in sugarcane mode, and the least was  $52\,676\text{ L/hm}^2$  in cassava+maize model. The amounts of the crop absorbing nitrogen, phosphorus and potassium were the most in cassava+maize model on July 13, Also the amounts of the nitrogen, phosphorus and potassium uptake by sugar cane were the most in sugar cane model on November 13. The amount of applying fertilizer of 3 cropping models was the highest in cassava+maize mode, higher in cassava+nut mode, but the least in sugar cane model. The runoff rate of nitrogen and phosphorus of 3 planting models was the highest in sugar cane model. The runoff rate of potassium of 3 planting models was the highest in cassava+maize model.

**Key words:** maize; planting model; nutrient; runoff

广西武鸣种植的主要经济作物有甘蔗、玉米、水稻、木薯、花生、龙眼等。大部分甘蔗、木薯、玉米等作

物都种植在坡耕地上,生产上一味地追求高产而盲目地进行施肥,尤其是尿素和复合肥。广西阳光充足,

收稿日期:2013-04-27

修回日期:2013-07-18

资助项目:广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 1298014-18)

作者简介:何铁光(1976—),男,湖南桂阳人,博士,副研究员,主要研究方向为环境生态。E-mail:tghe118@163.com

雨量充沛,雨季集中在 6—10 月,农民施过量化肥,作物来不及吸收和利用,肥料中的养分就随径流水流失,严重污染了环境,特别是水体污染和富营养化日趋严重,对水土保持产生了很大的负面影响<sup>[1-4]</sup>。农民投入大,成本高,增产不增收,经济效益低,严重打击了种植户的积极性。本研究通过研究广西特色经济作物在不同种植模式下的养分流失特征,寻求减少坡耕地养分径流流失的种植模式,为减少农业面源污染及提高肥料利用率,同时为充分利用土地,使农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地为武鸣县苏梁村坡度为 8°的坡耕地,土壤类型为赤红土,第四纪红土母质,具体位置为 23°17.043'N,108°8.790'E,高程 109 m。地处亚热带季风区,气候温和,雨量充沛,年平均气温 20~22℃,冬季少霜雪,年平均日照时数 1 660.1 h,年平均降雨量 1 100~1 700 mm。

### 1.2 试验设计

1.2.1 试验径流小区设计 试验径流小区的坡度都为 8°,土壤质地一致,每个径流小区的面积为 30 m<sup>2</sup>,长 5 m,宽 6 m,长度与等高线垂直,宽度与等高线平行,径流分流器和径流水接收桶统一安装在径流小区的右下角。径流分流器由 0.8 mm 铝板制作,入口口径为 21 cm,其中入口 1/3(7 cm)的径流水流入径流水接收桶中(径流水接收桶为口径 57.6 cm,底部直径 38.0 cm,边长 41.0 cm 带盖的塑料桶),其余的径流水随排水沟流走,四周做好排水沟和保护行。

1.2.2 试验方案 试验采用木薯、玉米、花生、甘蔗四种作物,设 3 个处理,3 次重复,随机排列,共 9 个径流小区。处理 1:木薯套种花生(木薯+花生);处理 2:木薯套种玉米(木薯+玉米);处理 3:甘蔗单种(甘蔗)。各处理作物施肥及种植密度详见表 1。

表 1 4 种作物每个小区施肥及株行距情况

不同作物	基肥/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	追肥/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	株行距 (cm×cm)
木薯	农家肥 7500	尿素 750	75×90
	三元复混肥 1500		
花生	农家肥 4500	无	20×70
	三元复混肥 562		
玉米	农家肥 11250	尿素 900	40×58
	三元复混肥 1500		
甘蔗	农家肥 9000	尿素 524	15×90
	三元复混肥 1500		
	尿素 223		

试验采用的农家肥是腐熟的猪粪和牛粪,三元复混肥是田园园复混肥(19—6.5—14.5);尿素是含纯氮 46%的尿素(表 2);试验中木薯、花生、玉米、甘蔗品种分别为木薯南植 199、桂花 771、绿玉、桂糖 128,播种时间分别为 2 月中旬、2 月 22 日、2 月中旬、3 月 20 日。

表 2 基础土壤、所施肥料中养分含量

不同类型	全 N/%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	K <sub>2</sub> O/%
基础土壤	0.12	0.10(全 P%)	0.30(全 K%)
农家肥	0.68	2.09	2.14
三元复混肥	19	6.5	14.5
尿素	46	—	—

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤 于 2012 年 2 月初取基础土壤,去除土壤表面杂草和腐植物,每个小区按 S 型采集土壤耕作层 0—20 cm 的 5 个土样混匀后采用四分法分取 0.5 kg 作为一个土壤样品。土壤鲜样测水分,土壤自然风干,并按要求研磨,保存在自封袋中;土壤干样分析全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、pH 值(表 3)。全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷含量测定采用钼锑抗比色法,全钾含量测定采用火焰光度法,碱解氮含量测定采用碱解扩散法,速效磷含量测定参照 NY/T148—1990 标准,速效钾含量测定采用乙酸铵提取—火焰光度法,有机质含量测定采用重铬酸钾容量法,pH 值含量测定采用电位法。

1.3.2 植株 于 2012 年 7 月 13 日和 11 月 13 日分别调查作物生长情况并采集植株样品,分根、茎、叶测其氮、磷、钾含量。植株全氮采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮—蒸馏法,全磷采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮—钼锑抗比色法,全钾采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮—火焰光度计法。

1.3.3 径流水 一定强度一定时间的降雨产生径流后,记录径流水体积或测量径流水的深度,充分搅拌均匀采集水样,盛放在聚乙烯瓶中,做好标记,保存在 0°冰箱中,在 1 周内完成其养分如总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、总钾的分析测定。水样总氮采用碱性过硫酸钾硝解紫外分光光度法,铵态氮采用靛酚蓝比色法,硝态氮采用紫外分光光度计比色法,总磷采用过硫酸钾消解钼锑抗比色法,总钾采用直接过滤—火焰光度计法。

1.3.4 氮(磷、钾)流失量和径流率计算<sup>[5]</sup>:

径流水氮(磷、钾)量(g/hm<sup>2</sup>)=径流水总氮(磷、钾)量(g)×10000/小区面积(m<sup>2</sup>);

氮(磷、钾)流失量(kg/hm<sup>2</sup>)=径流水总氮(磷、

钾)量(kg)×10000/小区面积(m<sup>2</sup>);

氮(磷、钾)径流率(%)=径流水总氮(磷、钾)量(kg)×100/土壤全氮(磷、钾)量(kg)。

植株氮素吸收量的计算方法如下<sup>[6]</sup>:

植株氮素吸收量=籽粒产量(或商品收获物产量)×籽粒氮素含量+秸秆产量(或废弃物部分)×秸秆氮素含量。为减少误差,籽粒产量、秸秆产量、氮素含量等指标均统一以烘干基(或鲜样)表示。

地表径流途径流失的氮、磷数量等于整个监测周期中(全年)各次径流水中污染物浓度与径流水体积乘积之和<sup>[6]</sup>。

1.4 统计分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 15.0 软件进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式土壤理化性状分析

不同种植模式下土壤理化性状都发生了改变(表 3),与种植前相比,在收获 1 时,3 种植模式的 pH 值、全钾含量均减少了,木薯套种花生下土壤全氮、有效钾含量也是降低的,其余的含量则为增加;木薯套种玉米除了碱解氮、有机质含量是减少的外,其余的含量均是增加的;甘蔗单种除了全氮、有机质含量降低外,其余的含量均是升高的。与收获 1 时相比,收

获 2 时 3 种植模式的土壤 pH 值、有机质及大多养分是增加的,除了木薯+花生的碱解氮、有效磷,木薯+玉米的碱解氮,甘蔗的碱解氮、有效磷、有效钾是减少的。这可能与作物从土壤中吸收有效养分如氮、磷、钾较多,导致土壤的有效养分减少,尤其是甘蔗后期需钾量较多,收获 2 时比收获 1 时甘蔗地有效钾含量减少了 91.2 mg/kg。作物通过根系吸收和利用土壤中的水分、养分,根系不断生长改变土壤的理化性状,这与李西祥的研究结果一致<sup>[7]</sup>。

2.2 不同种植模式径流水养分分析

3 种植模式径流液中的铵态氮、硝态氮、总氮、总磷、总钾全年流失量存在差异(表 4)。木薯+玉米模式径流水中的总磷、总钾、硝态氮流失量最大,分别为 164.7,387.8,532.0 g/hm<sup>2</sup>,其总氮、铵态氮流失量排第二位,分别为 731.4,81.3 g/hm<sup>2</sup>。甘蔗单种模式径流水总氮流失量最大为 852.29 g/hm<sup>2</sup>,总钾流失量居第二位为 328.2 g/hm<sup>2</sup>。木薯+花生模式径流水养分流失量除了总磷排第一(245.1 g/hm<sup>2</sup>)外,其余养分流失量都为最少。3 种植模式总氮都以硝态氮形式流失的较多,占总氮的 50%以上,铵态氮形式流失的较少,铵态氮/总氮值以甘蔗种植模式为最大,而硝态氮/总氮以木薯+玉米种植模式最大。说明广西坡耕旱地土壤氮素地表径流以硝态氮流失为主。

表 3 不同种植模式下不同时期的土壤理化性状

不同种植模式	不同时期	全氮/ %	全磷/ %	全钾/ %	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )
木薯+花生	种植前	0.11	0.04	0.53	116	31	121	5.2	26.7
	收获时 1	0.08	0.07	0.30	128	36	91	5.0	27.7
	收获时 2	0.13	0.08	0.42	103	17	144	5.4	40.5
木薯+玉米	种植前	0.08	0.06	0.42	149	24	160	5.6	25.6
	收获时 1	0.10	0.06	0.22	129	25	202	4.8	24.7
	收获时 2	0.13	0.10	0.35	122	29	435	5.2	43.3
甘蔗	种植前	0.09	0.05	0.48	183	14	101	5.3	21.3
	收获时 1	0.08	0.06	0.22	222	43	240	4.5	20.9
	收获时 2	0.13	0.10	0.30	136	11	149	4.8	30.4

注:收获时 1:玉米、花生收获时间;收获时 2:木薯、甘蔗收获时间。

表 4 不同种植模式下径流氮、磷、钾(6—10 月)流失量

不同种植模式	铵态氮/ (g·hm <sup>-2</sup> )	硝态氮/ (g·hm <sup>-2</sup> )	总氮/ (g·hm <sup>-2</sup> )	总磷/ (g·hm <sup>-2</sup> )	总钾/ (g·hm <sup>-2</sup> )	(铵态氮/ 总氮)/%	(硝态氮/ 总氮)/%
木薯+花生	54.2C	308.7C	454.3C	245.1A	284.7C	11.9	68.0
木薯+玉米	81.3B	532.0A	731.4B	164.7B	387.8A	11.1	72.7
甘蔗	264.3A	459.6B	852.3A	80.9C	328.2B	31.0	53.9

注:不同大写字母表示处理间差异达 1%显著水平。

2.3 不同种植模式下径流量

降雨是农田径流的主要驱动力,径流量是农田养

分径流流失的重要构成因素之一<sup>[8]</sup>。2012 年产生地表径流的降雨时间集中在 6—10 月,产生径流量最多

的是 7 月份。从径流总量看,木薯+花生种植模式产生径流总量最多为 60 974 L/hm<sup>2</sup>,其次是甘蔗种植模式为 58 583 L/hm<sup>2</sup>,最少的是木薯+玉米种植模式为 52 676 L/hm<sup>2</sup>(表 5)。木薯+花生、木薯+玉米、甘蔗 3 种模式 7 月份径流量分别为 46 207,36 371,44 834 L/hm<sup>2</sup>,分别占总径流量的 75.6%,69.0%,76.5%。7 月中旬甘蔗分蘖已结束,正处于伸长生长阶段,而花生、玉米已于 7 月初收获。可见木薯套种玉米能有效地减少地表径流量。

表 5 不同降雨量、不同降雨时长  
及不同种植模式下的径流量

日期 (月-日)	径流量/(L·hm <sup>-2</sup> )			降雨时 长/min	降雨 量/mm
	木薯+ 花生	木薯+ 玉米	甘蔗		
6-11	0	0	0	95	0.89
6-12	547	70	1794	70	1.06
6-15	77	140	67	50	0.41
6-22	0	0	0	185	0.57
6-24	0	0	0	175	0.62
6-26	0	0	0	280	0.65
7-17	784	817	554	130	33
7-18	0	0	0	80	22
7-23	0	0	0	445	25
7-24	800	820	564	330	44
7-25	24496	14204	22565	430	55
7-27	20127	20530	21151	468	25
8-6	7620	7967	7144	660	65
10-8	3258	4779	1417	402	23
10-29	3265	3352	3328	560	24
合计	60974	52676	58583	4360	320.2

2.4 降雨量、降雨时长与径流量相关关系

3 种植模式产生径流量与降雨时长、降雨量都存在显著相关性(表 6),其中木薯+花生种植模式与降雨时长、降雨量的相关性均达到极显著关系,相关系数分别为 0.463\*\*,0.517\*\* ;木薯+花生种植模式、甘蔗模式与降雨量的相关性均达到极显著关系,相关系数分别为 0.517\*\*,0.478\*\* 。表明产生径流

量多少与降雨强度、降雨时长及降雨量有关,同时不同种植模式对径流量也有一定的影响。

表 6 降雨量、降雨时长与不同种植模式产生径流量相关性

降雨情况	木薯+花生 径流量	木薯+玉米 径流量	甘蔗径流量
降雨时间	0.463**	0.528**	0.444*
降雨量	0.517**	0.431*	0.478**

注: \* 表示显著, \*\* 表示极显著。

2.5 不同种植模式下各种作物产量分析

不同作物的经济产量相差很大,同种作物如木薯的不同的种植模式,其经济产量也不同(表 7)。7 月 13 日收获时,木薯(+花生)经济产量、生物产量分别比木薯(+玉米)多 754,2 652 kg/hm<sup>2</sup>;11 月 13 日木薯(+花生)经济产量、生物产量分别比木薯(+玉米)多 2 526,2 741 kg/hm<sup>2</sup>,甘蔗于 11 月 13 日收获时,其经济产量、生物产量分别为 116 258,144 492 kg/hm<sup>2</sup>。玉米与木薯套种时因争夺土壤中的养分,充分利用了时间和空间,提高了肥料的利用率和光合效率。

2.6 不同种植模式不同作物养分吸收量分析

于 7 月 13 日收获玉米、花生时调查作物吸收养分氮、磷、钾的情况,木薯+玉米种植模式的作物吸收氮、磷、钾的量都是最多的,分别为 326,47,296 kg/hm<sup>2</sup>;其次是甘蔗单种模式,最少的是木薯+花生种植模式(表 8)。于 11 月 13 日收获木薯、甘蔗,并调查其经济产量、生物产量(表 7)及作物吸收氮、磷、钾养分的情况,甘蔗吸收氮、磷、钾量最多,分别为 172,21,314 kg/hm<sup>2</sup>,其次是木薯(+玉米),最少是木薯(+花生)。从不同作物吸收养分情况来看,吸收氮、磷养分最多的都是玉米,其次都是甘蔗(11 月 13 日),最少的均是花生;吸收钾最多的是甘蔗(11 月 13 日)314 kg/hm<sup>2</sup>,其次是甘蔗(7 月 13 日)260 kg/hm<sup>2</sup>,第三多的是玉米为 199 kg/hm<sup>2</sup>。这表明玉米对氮、磷的需求较大,而甘蔗对钾的需求量较大,生产上应根据作物的需肥规律,科学施肥,实现高产增效。

表 7 不同种植模式下各种作物的经济产量和生物量

不同作物	7 月 13 日					11 月 13 日		
	木薯(+花生)	花生	木薯(+玉米)	玉米	甘蔗	木薯(+花生)	木薯(+玉米)	甘蔗
经济产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	7020	336	6266	12438	33176	25362	22836	116258
生物产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	23325	1229	20673	29210	54816	27614	24873	144492

2.7 不同种植模式基础土壤养分含量及肥料投入量分析

依据表 1 和表 2 可以得出不同种植模式的基础土壤、施入所有肥料的氮、磷、钾养分含量情况(图 1)。3

种植模式中施入肥料量最大的是木薯+玉米,其次是木薯+花生,甘蔗最少。这与当地农户种植习惯和施肥习惯有关。木薯套种花生、木薯套种玉米,充分利用了土地时间和空间,提高了植物光能利用率。

表 8 不同时期不同作物对氮、磷、钾的吸收量

日期	种植模式	作物	氮/(kg·hm <sup>-2</sup> )	磷/(kg·hm <sup>-2</sup> )	钾/(kg·hm <sup>-2</sup> )
7月13日	木薯+花生	木薯	100	12	100
		花生	10	1	10
		木薯+花生	110	13	110
	木薯+玉米	木薯	106	12	96
		玉米	220	35	199
		木薯+玉米	326	47	296
11月13日	甘蔗	甘蔗	124	11	260
	木薯+花生	木薯	37	9	57
	木薯+玉米	木薯	50	10	64
	甘蔗	甘蔗	172	21	314

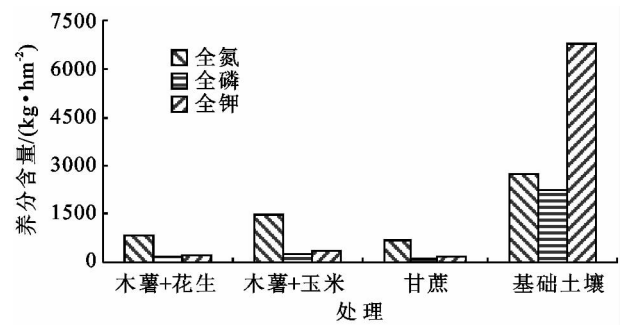


图 1 不同种植模式中基础土壤养分含量、肥料投入量

2.8 不同种植模式中径流水氮、磷、钾径流率分析

3 种植模式中氮、磷、钾养分径流率有差异,但差别不大(图 2)。其中氮径流率最大的是甘蔗单种,其次是木薯+玉米,最少的木薯+花生;磷径流率最大的是甘蔗单种,其次是木薯+花生模式,最少的是木薯+玉米模式;钾径流率最大的是木薯+玉米模式,其次是甘蔗单种,最少的是木薯+花生模式。养分径流率的大小与栽培模式、施肥类型、施肥时间、施肥量、降雨量、降雨强度、降雨时长、坡度、土壤类型等多种因素有关。广西南方降雨集中在 6—10 月,甘蔗在 6 月中旬进行大培土,土层疏松,土壤中的养分氮、磷随着降雨产生的径流水而流失,且流失率最大。

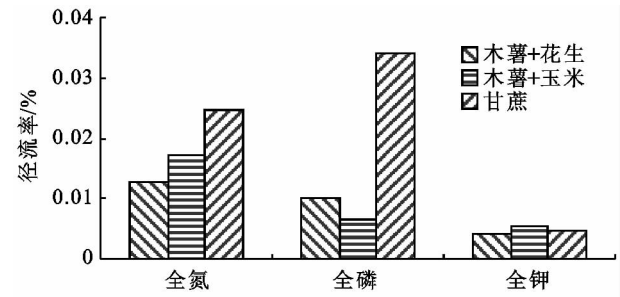


图 2 不同种植模式中径流水氮、磷、钾径流率

3 讨论

施肥可以改变丘陵旱地土壤的理化性状,同时可以提高作物的产量,施不同类型的肥料对作物品质影响很大<sup>[9]</sup>。不同作物对养分的需求不同,同一种作物

的不同时期对养分的需求也不同。如甘蔗苗期需要氮肥较多,后期需要钾肥较多,种植户应该根据作物需肥规律施肥,减少养分随地表径流水流失,提高肥料的利用率,减缓农业面源污染<sup>[10-11]</sup>。土壤亚表层具有很强的固定元素能力,土壤渗漏水氮磷浓度一般很低,地表径流的溶解和搬运是其流失的主要途径<sup>[12-14]</sup>。径流的产生受降雨强度、降雨时长和降雨量的影响,当降雨强度大于入渗强度时,会产生地表径流<sup>[15]</sup>。良好的农作物和植被覆盖则对坡面水土流失有明显的抑制作用<sup>[16]</sup>。进行不同种植模式试验时,从 6—10 月收集了 8 次天然降雨产生的地表径流水样。施肥不当易使养分流失,污染环境。不同种植模式对地表径流量有一定的影响,而地表径流水中养分的流失量与径流量和径流水中养分浓度有关,也与种植模式,施肥量、施肥时间,施肥类型及作物的生长情况有关。

4 结论

广西产生径流的月份在 6—10 月,氮素以硝态氮形式流失,流失量占总氮的 50% 以上;木薯+花生种植模式产生径流总量最多,其次是甘蔗单种模式,最少的是木薯+玉米种植模式;7 月 13 日木薯+玉米种植模式吸收氮、磷、钾的量最多,其次是 11 月 13 日甘蔗吸收氮、磷、钾的量,第三是玉米作物。总的来说,甘蔗、玉米需肥都较多,尤其是甘蔗需要钾肥多。养分氮、磷流失率最大的是甘蔗单种模式,养分钾流失率最大的是木薯+玉米模式,生产上应根据作物需肥规律施肥,减少肥料养分流失,提高肥料利用率,保护生态环境。

参考文献:

[1] 蔡覆冰. 太湖流域水体富营养化成因及防治对策的初步研究[J]. 中国环境监测, 2003, 19(3): 52-55.  
[2] 刘兆德, 虞孝感, 王志宪. 太湖流域水环境污染现状与治理的新建议[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 467-474.

新的计算河道环境需水的方法,计算结果可靠、操作方便。

3 结论与讨论

第一次应用国内自主研发的 HIMS 模型,构建了西营河流域的分布式水文模型,并模拟了径流量及河流生态基流,验证了 HIMS 模型的适用性。HIMS 模型模拟与验证精度较高,月过程的模型率定期和验证期 Nash-Suttcliffe 效率系数分别为 0.81 和 0.85,日过程的模型测定期和验证期 Nash-Suttcliffe 效率系数分别为 0.64 和 0.67。以 HIMS 模型模拟的径流量,用最小月流量平均法估算得到河道生态基流为 0.523 亿 m<sup>3</sup>。通过对西营河流域的河道生态基流量的盈缺分析,表明西营河河流生态基流可以得到满足。因此,基于 HIMS 模型估算河道内生态基流的方法可以推广到石羊河其他子流域上,从而估算出石羊河流域河道内生态需水量,为石羊河流域的水资源管理提供科学依据。

(上接第 99 页)

[3] 郭建平,吴璞成,熊建安.洞庭湖水体污染及防治对策研究[J].湖南文理学报:社会科学版,2007,32(1):91-94.

[4] 贝荣塔,周跃,何敏.土壤中氮磷和滇池水体污染的潜在关系[J].西北林学院学报,2010,25(2):35-39.

[5] 李其林,魏朝富,李震,等.三峡库区坡耕地氮磷径流特征[J].土壤通报,2010,41(6):1399-1455.

[6] 王桂苓.巢湖流域麦稻轮作农田养分径流流失特征初步研究[D].合肥:安徽农业大学,2009:24-25.

[7] 李西祥,白红英,丁琪,等.黄土地区冬小麦田土壤理化性状、磷酸酶活性与氧化亚氮的排放[J].生态学杂志,2007,26(8):1187-1192.

[8] 王静,郭熙盛,王允青,等.巢湖流域不同耕作和施肥方式下农田养分径流流失特征[J].水土保持学报,2012,26(1):6-11.

[9] 彭树初,陈雄鹰,胡明勇,等.长沙市平原旱地土壤氮磷径流特征研究[J].湖南农业科学,2009(6):61-64.

[10] 焦平金,许迪,王少丽.汛期不同作物种植模式下地表

参考文献:

[1] 任建民,忤彦卿,贡力.人类活动对内陆河石羊河流域水资源转化的影响[J].干旱区资源与环境,2007,2(8):7-11.

[2] 郝博.基于 GIS 和 RS 的石羊河流域植被生态需水的时空分布规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.

[3] 万东辉,夏军,宋献方,等.基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算[J].水利学报,2008,39(8):994-1000.

[4] 吴梦莹,王中根,党素珍.基于 HIMS 的黑河上游山区径流模拟分析[J].资源科学,2012,34(10):1913-1921.

[5] 刘昌明,夏军,郭生练,等.黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J].水科学进展,2004,15(4):495-500.

[6] 肖玉成,董飞,张新华,等.基于 SWAT 分布式水文模型的河道内生态基流[J].四川大学学报:自然科学报,2013,45(1),85-90.

[7] 宋明伟,张仁涉,李宗礼,等.石羊河流域河流系统生态环境需水量概算[J].水土保持学报,2007,21(5):137-141.

径流氮磷流失研究[J].水土保持学报,2009,23(2):15-20.

[11] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生.农业非点源污染防治技术的研究现状与进展[J].农业工程学报,2008,24(4):290-295.

[12] Ryden J C, Syers J K, Harris R F. Phosphorus in run-off and streams[J]. Advance in Agronomy,1973,25:1-45.

[13] Summers R N, Guise N R, Smirk D D. Bauxite residue (red mud) increases phosphorus retention in sandy soil catchments in Western Australia [J]. Fertilizer Research,1993,34(1):85-94.

[14] 王晓燕,王晓峰,汪清平.北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J].地理科学,2004,24(2):227-232.

[15] 张丽萍,张妙仙.土壤侵蚀正态模型试验中产流畸变系数[J].土壤学报,2000,37(4):449-455.

[16] 冉大川,王宏,刘斌,等.黄河中游地区林草措施减洪减沙作用分析[J].水土保持研究,2003,10(4):141-143.