

# 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响

林超文<sup>1</sup>, 罗春燕<sup>1</sup>, 庞良玉<sup>1</sup>, 黄晶晶<sup>1</sup>, 涂仕华<sup>1,2</sup>

(1.四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066; 国际植物营养研究所成都代表处, 成都 610066)

摘要: 该研究目的是揭示紫色土地区坡耕地不同施肥方式在不同雨强条件下对土壤养分流失途径及流失量的影响规律, 为紫色土坡耕地肥料管理及养分流失治理提供理论依据。试验采用两因素、三水平随机区组试验, 利用自然降雨和人工降雨相结合的方法, 采用模拟径流小区观测地表径流量、壤中流量、泥沙侵蚀量, 取样分析养分流失量。一次性施肥显著提高了玉米生育前期地下水中N浓度, 加大了N的径流损失, 降低了N肥利用率, 使玉米生育后期供肥不足, 造成玉米减产。N的主要损失载体是壤中流, 平均损失量达5.08 kg/ha, 对环境造成了较大压力; 并且受雨强影响小, 受施肥方式影响大, 一次性施肥显著加大了N的损失。P损失的主要载体是泥沙, 受雨强影响大, 雨强越大, P损失量显著增加, 而受肥方式影响小。K损失的主要载体也是泥沙, 平均损失量达29.1 kg/ha, 雨强越大, K损失量成倍增加, 施肥方式对K总损失量影响不大。氮的损失载体主要是壤中流, 磷钾的损失载体主要是泥沙。一次施肥显著增加了玉米生育前期壤中流N浓度, 显著增加氮的损失。在紫色土地区, 不仅要采用分次施肥等施肥技术控制P、K和部分N损失, 还需增厚土层、改良土壤结构, 提高土壤蓄水保肥能力, 才能更全面控制紫色土的氮、磷、钾损失。

关键词: 雨强; 施肥方式; 紫色土; 养分流失; 土壤侵蚀

## Effect of different fertilization methods and rain intensity on soil nutrient loss from a purple soil

LIN Chao-wen, LUO Chun-yan, PANG Liang-yu, HUANG Jing-jing, TU Shi-hua

(Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the influence of different fertilization methods on the pathway and amount of nutrients lost under different rain intensity in the purple hilly area and in return to provide theoretical evidence in improving fertilizer management and nutrient loss control on sloping farmlands in purple area. A completely randomized block design was employed in the experiment with three different artificial rain intensities (slight, medium and heavy), three fertilization methods and three replications. The nitrogen content of under ground runoff was increased notably by fertilization in one time, by the way, the N losed amount by runoff was increased, and the nitrogen efficiency was decreased, corn yield was decreased also. The main carrier of losed N was underground runoff, the average losed amount of N was 5.08 kg/ha, the losed N from field make high pressure to the environment, and N losed amount was influenced by rain intensity slightly, but was influenced by fertilization methods strongly. The main carrier of losed P was sediment, losed amount P was influenced by rain intensity strongly, but by fertilization methods slightly. The main carrier of losed K was sediment also, the average losed amount of K was 29.1 kg/ha, the rain intensity higher, the losed amount of K times bigger, losed amount K was influenced by fertilization methods slightly. The nitrogen content of under ground runoff was increased notably by fertilization in one time, by the way, the N losed amount by runoff was increased remarkably. On the sloping purple farmland, P and K were lost in sediment and the quantity was influenced by rain intensity, implying

---

\*通讯作者

that to control P and K loss, soil erosion must be minimized first. In order to control N losses in the purple soil area, not only fertilization separately must be adopted, the integrated agronomic methods such as cultivation practices against soil erosion and water loss, soil depth improvement and soil structure improvement can be employed also.

Key words: Rain intensity; Fertilization method; Purple soil; Nutrient loss; Soil erosion

农业流域非点源污染物的大量输出,特别是农田径流中氮、磷输出是构成地表水体富营养化的主要原因<sup>[1、2]</sup>。紫色土作为长江中上游地区主要的耕作性土壤类型之一,水土流失及其引起的养分流失问题十分严重<sup>[3、4]</sup>。紫色土坡耕地已被认为是三峡库区泥沙的主要来源和主要的面源污染来源。深入系统地研究不同的施肥方式在不同雨强条件下对土壤侵蚀及养分流失的影响规律为土壤养分流失控制和农业面源污染防治提供理论基础和技术支撑。近年来,不少学者针对紫色土坡面的侵蚀产沙和养分迁移规律等问题做过一些研究,这些研究普遍针对地表径流作用下的坡面侵蚀产沙、养分随地表径流和泥沙迁移规律展开<sup>[5-8]</sup>。由于紫色土具有土层浅薄,土壤饱和渗漏率大等特性<sup>[9]</sup>,壤中流在紫色土区普遍存在且在总径流量中占有相当的份额<sup>[10]</sup>。随着对壤中流研究的不断深入,壤中流的产生<sup>[11]</sup>及其对养分输出的影响已经引起一些研究者的注意<sup>[12-15]</sup>,这些研究主要围绕不同耕作方式、施肥配方、雨强、坡度、PAM(聚丙烯酰胺)等因素对紫色土养分流失的影响研究。在玉米生产中,对施肥方式的研究主要围绕施肥方式对玉米产量、肥料利用率等的影响展开<sup>[16、17]</sup>。但施肥方式在不同雨强条件下对紫色土坡耕地土壤养分随泥沙、地表径流、地下径流迁移流失的研究鲜见报道。本文以紫色土坡耕地为研究对象,利用自然降雨和人工降雨相结合的方法,研究不同施肥方式下,种植玉米紫色土坡耕地土壤氮磷钾的迁移规律,以期为提高土壤肥料利用率和减少农业面源污染提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

田间试验布设在长江上游沱江水系花椒沟小支流的响水滩上段,位于 E104°34'12" ~ 104°35'19"和 N30°05'12" ~ 30°06'44"之间,属四川省资阳市雁江区松涛镇的响水村与花椒村

，平均海拔 395 m。该区多年均降雨量为 965.8 mm，多雨年 1 290.7 mm，少雨年 725.2 mm，70%分布于 6~9 月。年均温 16.8℃，极端高温和低温分别为 36.5℃和-3.6℃。供试土壤为遂宁组母质发育的紫色红沙土，质地较轻，pH 7.28，有机质含量 5.1 g/kg，全氮和碱解氮分别为 0.56g/kg 和 54.5 mg/kg，全磷和有效磷分别为 0.94 g/kg 和 6.26 mg/kg，全钾和有效钾分别为 13.8 g/kg 和 97.3 mg/kg，土壤肥力不高。

## 1.2 试验设计

本试验为雨强和施肥方式的两因素三水平三重复随机区组试验。研究区夏季暴雨多，根据多年气象资料分析<sup>[18]</sup>，该区域最大小时降雨量达 93.0 mm，最大十分钟降雨量达 30.3 mm，每年单次降雨量 50~100 mm 的有 3.7 次。因此，本试验设计了 0.972、1.741、2.255 mm/min 3 种降雨强度，雨量控制为 60 mm，降雨历时分别为 61.7、34.5、26.6 min。耕作方式为目前生产上农民习惯的顺坡垄作。施肥水平为农户常用水平，施肥方式分为底肥一次施用（简称一次）、干肥窝施（简称干窝）、兑清水后窝施（简称水窝）。重复 3 次。共设试验小区 27 个。

供试作物玉米（*I. mays* L.）品种为成单 18，种植密度 42000 株/ha，2008 年 4 月 1 日播种，7 月 27 日收获，全生育期自然降雨量 374.3mm。玉米施肥量及时间见表 1。

表 1 玉米试验施肥表

Table 1 Amounts of nutrients applied to maize (kg/ha)

养分 Nutrient	施肥时间 Fertilizing date				施肥总量 Total (kg/ha)
	4 月 1 日 1 Apr.	4 月 25 日 25 Apr.	5 月 10 日 10 May	6 月 13 日 13 June	
N	30	60	60	150	300
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	150	0	0	0	150
K <sub>2</sub> O	75	0	0	75	150

由于前三次氮肥施用量少，亦非暴雨季节，本研究故把人工降雨安排在攻苞肥后。在攻苞肥施用后立即用人工降雨装置对小区进行模拟降雨试验（每天完成一个重复，如遇下雨顺延）。收集地表径流量、泥沙量、地下径流量，并取样分析养分含量，计算不同施肥方式及雨强

条件下的土壤养分流失量。

人工降雨装置采用中国科学院水土保持研究所生产的 SR 型野外移动式人工模拟降雨器,装置喷头系统为美国 V-80100,降雨高度 6m,降雨均匀系数在 75% 以上。

模拟降雨试验小区坡度设为  $10^\circ$ ,代表长江上游紫色丘陵区大面积的坡耕地坡度,小区东西向,面积  $8\text{ m}^2$  ( $4\text{ m}\times 2\text{ m}$ )。小区四壁用砖砌成,下垫面用混泥土固化防渗,保持与土面相同坡度收集地下径流,其上铺 10 cm 厚石英砂,随后覆土 60 cm (过 10 mm 筛),代表常见紫色土坡耕地土层厚度,填埋土壤容重控制在  $(1.3\pm 0.1)\text{ g/cm}^3$ 。每个小区坡面下部用集流装置收集地表径流。小区经过 3 年耕种后已基本恢复土壤结构。

### 1.3 养分流失量观测方法

**地表养分流失量观测方法:** 自然降雨一次性测定地表径流量及土壤侵蚀量,并取样分析养分含量,计算自然降雨条件下的地表养分流失量。人工降雨条件下,根据产流多少,分 3 个时段测定地表径流量并分别取样。降雨结束后在每个径流桶收集浑水样,采用烘干法测定含沙量,并计算全部产沙量。同时,对所接的径流过程样进行过滤,分析每个水样养分含量。由于泥沙养分含量比较稳定,因此,每个小区只取一个混合样测定泥沙养分含量。另外,取表层 0~20 cm 土壤样作为泥沙对照。

**地下养分淋失观测:** 自然降雨一次性测定壤中流流量,并取样分析养分含量,计算自然降雨条件下的地下养分流失量。人工降雨条件下,分 3 个时段测定壤中流流量,并分别取样分析每个样的养分含量。一般地下径流没有泥沙,因此不做泥沙含量分析。

**玉米冠层特征观测方法:** 每次自然降雨及人工降雨后立即测定玉米覆盖度和株高。玉米覆盖度采用数码相机照相分析法测定<sup>[19]</sup>;玉米高度采用直尺测量法测定。

### 1.4 测试项目和分析方法

泥沙主要测定有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量。水样测定全氮、磷、钾的含量。测定方法采用土壤理化常规分析方法<sup>[20]</sup>。

## 2、研究结果

试验研究期间，共产生地表径流7次，分别为6月6日、6月11日、6月13日-15日、6月15日、6月23日、7月12日、7月21日，其中6月13日-15日是人工降雨，其他为自然降雨。产生地下径流的降雨有6月11日，6月13日-15日，6月15日，6月23日，其中6月13日-15日是人工降雨，其他为自然降雨。

## 2.1 施肥方式对玉米覆盖度和产量的影响

从表2 可以看出，一次性施肥在苗期能够显著促进玉米生长。5月3日测定，一次性施肥处理的玉米覆盖度比干窝分次施用处理提高了43.8%，比兑水分次施用处理提高了28.4%。而在玉米拔节期，兑水分次施用处理的玉米长势最旺，一次性施用处理的玉米长势最差。5月22日测定，一次施用处理的玉米覆盖度比兑水分次施用处理低12.4%，比干窝分次施用处理低6.4%。在抽雄开花期，各处理玉米覆盖度趋于一致。而从玉米产量看，一次性施肥的玉米产量显著低于分次兑水窝施的玉米产量（分别比分次干施和分次水施低4.8%和7.0%）。说明一次性施肥方式在玉米需肥高峰的生长后期供肥不足，造成玉米减产。

表2 不同施肥方式的玉米产量

Table 2 The corn yields of different fertilization methods

处理 treatments	覆盖度 (%) Plant cover (%)				玉米产量 (kg/ha) Corn yield(kg/ha)
	4月1日 1 Apr	5月3日 3 May	5月22日 22 May	6月10日 10 May	
一次施用 Applied one time	5.30a	22.73a	57.17bc	74.85a	6695.8 b
分次干窝 Applied separately	5.60a	15.81bc	60.84ab	75.80a	7016.3ab
分次水窝 Applied separately with water	5.50a	17.70b	64.24a	75.20a	7166.8 a

注：试验结果采用 LSD 法 5%水平显著性检验。下同

## 2.2 不同施肥方式对径流液中养分浓度的影响

从图1、图2可以看出，地表径流中N浓度受施肥方式的影响较小，受施肥时间影响较大，6月13日刚施用攻苞肥后，地表径流中N浓度显著提高，其他各次地表径流中N浓度差异不大。地下径流中N浓度受施肥方式影响较大。分次干窝施用及分次兑水施用处理都使地下径流中N浓度随时间推移而持续升高。而一次性施肥使玉米生长中、前期地下径流中N浓度显著提高，加大N的淋溶损失；而在玉米生长后期则显著降低，使土壤在玉米生长后期供N不足，造成减产。地表径流平均N浓度为 $3.68\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，地下径流N浓度平均为 $31.74\text{mg}/\text{kg}$ ，是地表

径流N浓度的8.6倍，说明N的主要流失途径是地下径流。

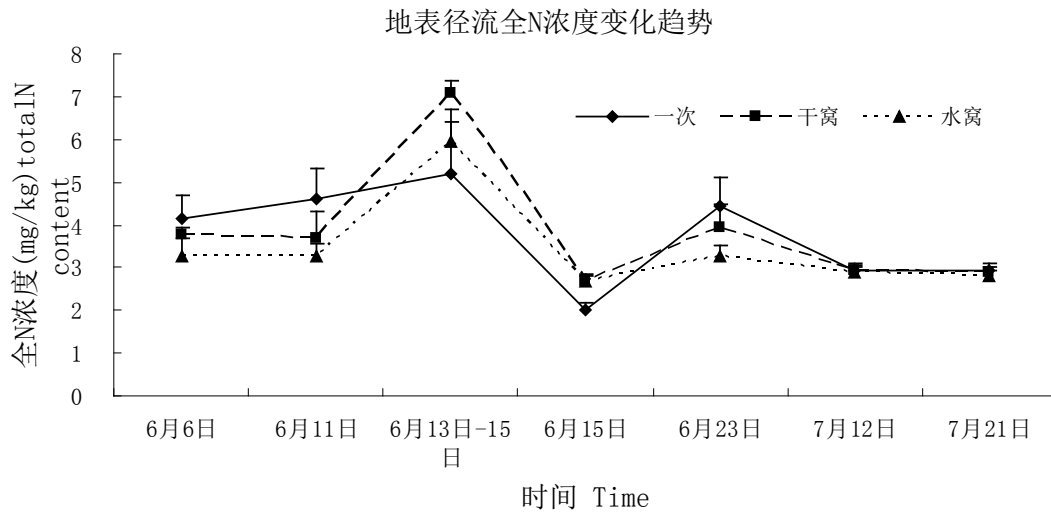


图1 不同施肥方式对地表径流全N浓度的影响

Fig. 1 The influence of fertilization methods on the total N content of surface runoff

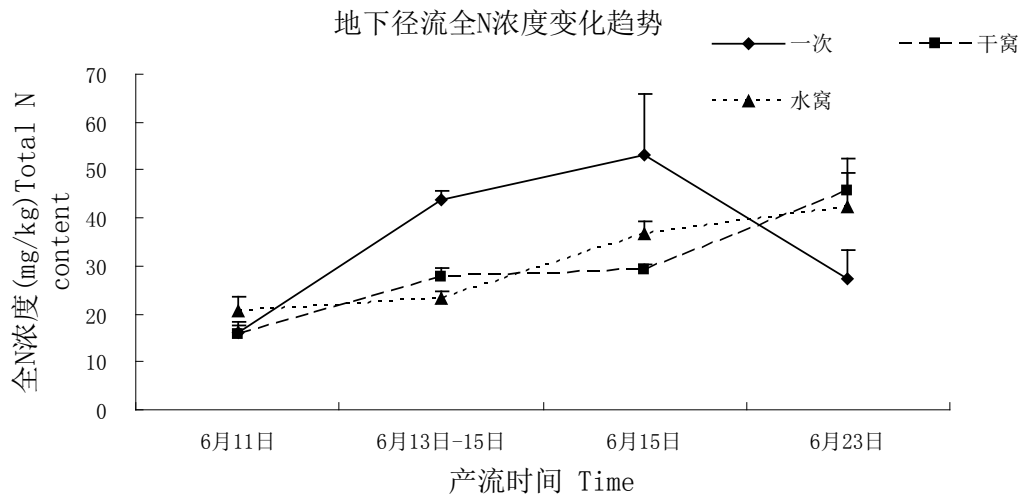


图2不同施肥方式对地下径流全N浓度的影响

Fig. 2 The influence of fertilization methods on the total N content of underground runoff

图3、图4可以看出，地表径流平均总P浓度为0.097mg/kg，在玉米生长前期变化较大，后期趋于稳定。地下径流平均总P浓度是0.031mg/kg，不到地表径流的1/3，并且随着时间的推移，地下径流中P的浓度逐渐降低，说明磷容易被土壤

吸附，不易在土壤中移动，其随径流的损失量非常微小。虽然所有处理的P都是一次施用，但一次施用处理（全部N、P、K）的地下径流中P的浓度低于分次施用处理，原因不太明确，需要进一步研究。

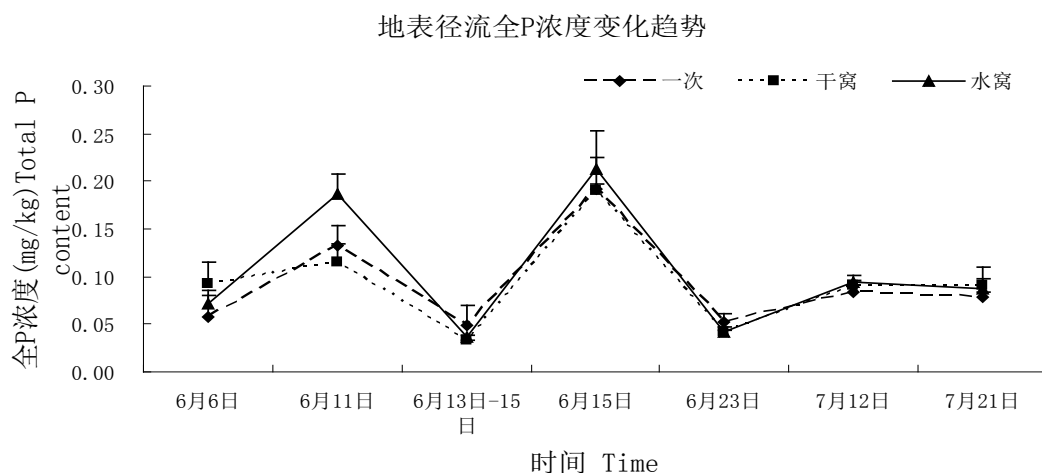


图3 不同施肥方式对地表径流全P浓度的影响

Fig. 3 The influence of fertilization methods on the total P content of surface runoff

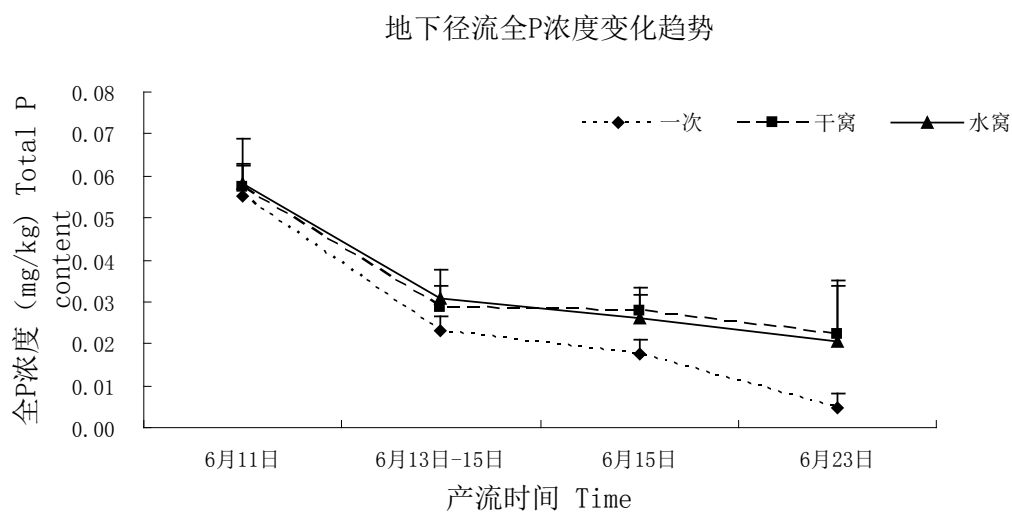


图4 不同施肥方式对地下径流全P浓度的影响

Fig. 4 The influence of fertilization methods on the total P content of underground runoff

从图5、图6可以看出，第一次地表径流和第一次地下径流中的K浓度都显著高于以后各次径流。第一次地表径流平均K浓度为14.9mg/kg，以后各次地表径流平均K浓度为3.8mg/kg，并且不受施用方式和施用量的影响，说明较长时间的干旱条件有利于土壤钾的游离释放，提

高K在土壤中的有效性，而当土壤经过一次径流淋洗后，土壤有效钾含量在短时间（20天）内难以恢复到较高水平，即使施用钾肥后立即降雨，径流中K的浓度与不施钾肥处理的没有差异。地下径流中K的浓度变化趋势与地表径流中的情况相似，说明紫色土容纳吸附K的能力很强，施用K时土壤能够快速吸附容纳，控制流失，而不施用钾肥时，土壤能够释放足够的钾供作物吸收利用，这可能是紫色土地区施用钾肥效果差的原因之一。

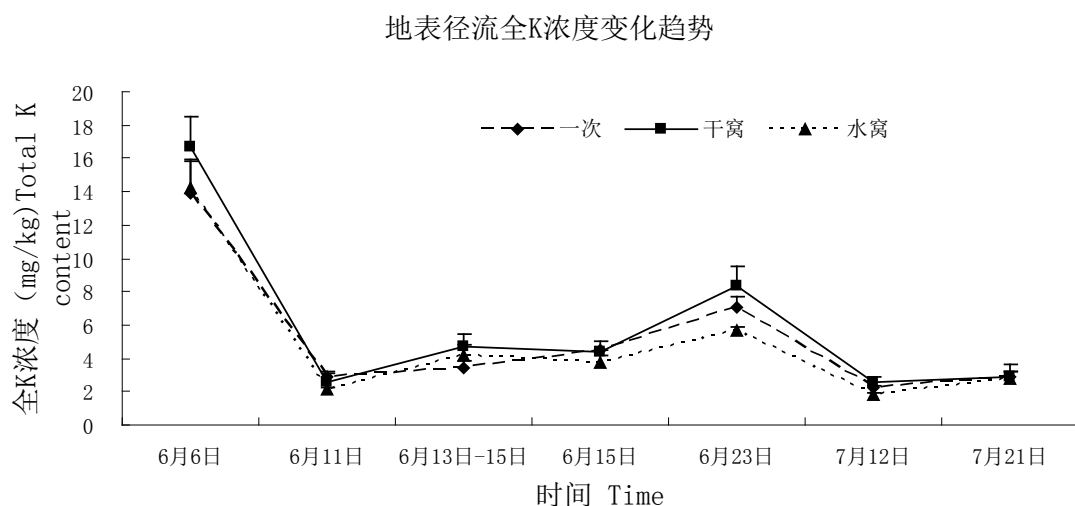


图5 不同施肥方式对地表径流全K浓度的影响

Fig. 5 The influence of fertilization methods on the total K content of surface runoff

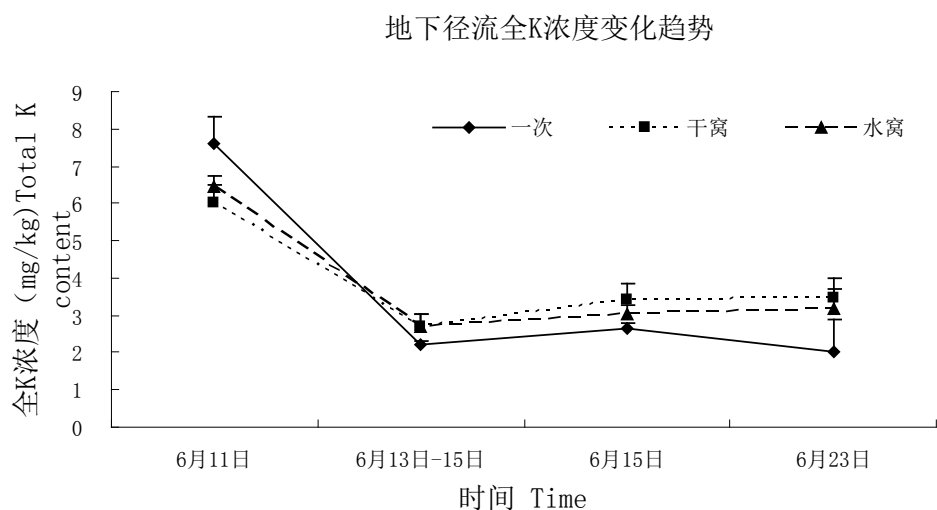


图6 不同施肥方式对地下径流全K浓度的影响

Fig. 6 The influence of fertilization methods on the total K content of underground runoff



### 2.3 雨强及施肥方式对径流养分流失量及途径的影响

由于自然降雨条件下各处理间没有雨强差异，养分损失仅以单次人工降雨为分析对象。从表3可以看出，小雨强条件下N平均径流损失量为4.40kg/ha，中雨强条件下为3.78kg/ha，大雨强条件下为4.27kg/ha，说明N的径流损失量受雨强的影响较小。一次性施肥在各种雨强条件下的N平均径流损失量为5.68 kg/ha，干窝分次施用为3.90 kg/ha，兑水分次施用为2.86 kg/ha，说明施肥方式对N的径流损失量影响很大，一次性施肥显著增加了N随径流的损失量。从N损失途径看，随着雨强的增大，N通过地下径流的损失量逐渐减少，通过地表径流的损失量逐渐增加，在中小雨强时，主要通过地下径流损失，在大雨强时，通过地表径流的损失量稍多。一次性施肥N通过地下径流的平均损失比例为72.1%，干窝分次施用为57.1%，兑水分次施用为59.8%，说明一次性施肥主要加大了地下径流N的损失量，从而增加了N的总损失量。P随径流的损失量非常微小，并且主要通过地表径流损失，因此，雨强越大，损失量越大，施肥方式对P的损失量影响也很小。K主要通过地表径流损失，其损失量有随雨强增大而增大的趋势。干窝分次施用加大K的地表径流损失量，从而加大K的总损失量。（一次施用平均0.97 kg/ha，干窝平均1.23 kg/ha，水窝平均0.90 kg/ha）。

表3 雨强及施肥方式对径流养分流失量及分配比例的影响

Table 3 The influence of rain intensity and fertilization methods on nutrient losed amount by runoff kg/ha

处理 Treatment		地表径流流失量			地下径流流失量 (UN)			径流总流失量(TN)			UN/TN (%)		
		Nutrient losed amount by surface runoff			Nutrient losed amount by underground runoff			Nutrient losed amount by runoff			N	P	K
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
小雨	一次	0.63d	0.005c	0.70b	6.56a	0.004a	0.21ab	7.19a	0.009ab	0.91ab	91.2	42.7	22.7
	干窝	1.17c	0.007bc	1.10a	2.51c	0.001b	0.19b	3.68bc	0.008bc	1.29a	68.2	17.9	15.0
	水窝	0.53d	0.004c	0.52c	1.79d	0.002ab	0.13bc	2.32cd	0.005c	0.65b	77.1	33.3	19.7
中雨	一次	1.19c	0.018a	0.78b	2.68bc	0.002ab	0.16b	3.87bc	0.019a	0.93ab	69.3	9.2	16.7
	干窝	1.53bc	0.007bc	0.88ab	2.74bc	0.004a	0.28a	4.27b	0.011ab	1.16a	64.2	38.8	23.9
	水窝	1.15c	0.006bc	0.68bc	2.04cd	0.004a	0.25a	3.19c	0.010ab	0.94ab	64.0	38.3	27.1
大雨	一次	2.65a	0.010b	0.95ab	3.34b	0.001b	0.13bc	5.99ab	0.011ab	1.08ab	55.8	9.3	11.8
	干窝	2.30ab	0.010b	1.09a	1.46d	0.001b	0.16b	3.75bc	0.011ab	1.25a	38.9	13.0	12.7
	水窝	1.89b	0.012ab	1.01ab	1.17de	0.001b	0.11c	3.06c	0.013ab	1.12a	38.2	7.1	10.2

### 2.4 雨强及施肥方式对有效养分流失量及分配比例的影响

从表4可以看出，土壤有效N主要通过径流损失，其受施肥方式和雨强的影响规律和径流养分损失量一致。土壤有效P在中小雨强时主要通过径流损失，在大雨强时主要通过泥沙损失，并且雨强越大，有效P损失量越大。土壤有效K也主要通过径流损失，雨强越大，损

失量越大，干窝施用加大土壤有效K的损失。

表4 雨强及施肥方式对有效养分流失量及分配比例的影响

Table 4 The influence of rain intensity and fertilization methods on available nutrient lost amount kg/ha

处理 Treatment		径流养分总流失量(RN) Available nutrient lost amount by runoff			泥沙有效养分损失量 Available nutrient lost amount by sediment			总有效养分损失量(TN) Available nutrient lost amount			RN/TN (%)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
小雨	一次	7.19a	0.009ab	0.91ab	0.01bc	0.002cd	0.04cd	7.20a	0.011c	0.95	99.8	80.3	96.1
	干窝	3.68bc	0.008bc	1.29a	0.02bc	0.003bc	0.05cd	3.70bc	0.011c	1.34ab	99.6	74.7	96.6
	水窝	2.32cd	0.005c	0.65b	0.01bc	0.001cd	0.02cd	2.33cd	0.006cd	0.67bc	99.7	81.1	97.1
中雨	一次	3.87bc	0.019a	0.93ab	0.04b	0.008b	0.13c	3.91bc	0.027ab	1.06b	98.9	70.3	87.8
	干窝	4.27b	0.011ab	1.16a	0.08ab	0.010b	0.18bc	4.35b	0.021bc	1.34ab	98.3	52.6	86.3
	水窝	3.19c	0.010ab	0.94ab	0.03b	0.005bc	0.11c	3.22bcd	0.015bc	1.05b	98.9	65.6	89.7
大雨	一次	5.99ab	0.011ab	1.08ab	0.16a	0.026a	0.41a	6.15ab	0.037a	1.49a	97.4	29.4	72.7
	干窝	3.75bc	0.011ab	1.25a	0.12a	0.019ab	0.33ab	3.87bc	0.030ab	1.58a	96.8	36.4	78.9
	水窝	3.06c	0.013ab	1.12a	0.11a	0.022a	0.33ab	3.17cd	0.035a	1.45a	96.6	37.2	77.2

### 2.5 雨强及施肥方式对总养分损失量及损失途径的影响

从表5可以看出，N主要通过径流损失，平均损失量达5.08 kg·hm<sup>-2</sup>，对环境造成了较大压力；雨强对N的损失量影响较小，施肥方式对N的损失量影响较大，一次性施肥显著加大了N的损失。P主要通过泥沙损失，因此，受雨强的影响较大，雨强越大，P损失量显著增加，施肥方式对P的损失量影响较小。K的损失途径主要是泥沙，雨强越大，K损失量成倍增加，施肥方式对K总损失量影响不大。

表5 雨强及施肥方式对总养分损失量及损失途径的影响

Table 5 The influence of rain intensity and fertilization methods on total nutrient losses kg/ha

处理 Treatment		径流养分总流失量(RN) Nutrient loss in runoff			泥沙养分总损失量 Nutrient loss in sediment			总养分损失量(TN) Total nutrient loss			RN/Tn (%)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
小雨	一次	7.19a	0.009ab	0.91ab	0.19c	0.254c	5.79c	7.38a	0.263c	6.70c	97.4	3.4	13.6
	干窝	3.68bc	0.008bc	1.29a	0.24bc	0.312c	7.10c	3.92bc	0.320c	8.39c	93.9	2.5	15.4
	水窝	2.32cd	0.005c	0.65b	0.10cd	0.134c	3.05cd	2.42cd	0.139c	3.70cd	95.8	3.6	17.6
中雨	一次	3.87bc	0.019a	0.93ab	0.63b	0.872bc	18.17b	4.50bc	0.891bc	19.10b	86.1	2.1	4.9
	干窝	4.27b	0.011ab	1.16a	1.03ab	1.413b	28.75ab	5.30b	1.424b	29.91ab	80.6	0.8	3.9
	水窝	3.19c	0.010ab	0.94ab	0.52b	0.733bc	16.25b	3.71c	0.743bc	17.19b	85.9	1.3	5.5
大雨 ity	一次	5.99ab	0.011ab	1.08ab	2.02a	2.499a	59.73a	8.01a	2.510a	60.81a	74.7	0.4	1.8
	干窝	3.75bc	0.011ab	1.25a	1.86a	2.354a	54.97a	5.61bc	2.365a	56.22a	66.9	0.5	2.2
	水窝	3.06c	0.013ab	1.12a	1.79a	2.116a	59.16a	4.85c	2.129a	60.28a	63.1	0.6	1.9

## 3 讨论

许多其它研究<sup>[21-24]</sup>认为紫色土养分流失的载体主要为泥沙，流失泥沙中的养分远多于径流溶蚀携带的养分，并且可以将泥沙携带的养分流失量看成坡面养分流失量。本研究的结果与前人的研究结果有一定的差异，主要是因为前人的研究没有考虑壤中流对土壤养分流失的影响。而紫色土渗漏速率快，土层薄，壤中流带走的土壤养分占紫色土总损失养分的比例很大，要研究紫色土养分损失，必须考虑壤中流这一重要因素。

由于玉米耐肥能力很强，一次性施肥在玉米生育前期不会对玉米造成肥害，反而促进玉米苗生长，但大大提高了玉米生育前期地下径流中N浓度，加大了N的径流损失，降低了N肥利用率，使玉米生育后期供肥不足，造成玉米减产。第一次径流K浓度远高于以后各次径流K浓度，说明长期干旱有利于紫色土K的释放，并且施用钾肥对径流K浓度影响不大，说明紫色土容纳K的能力很强，施用K时土壤能够吸附容纳，控制流失，而不施用钾肥时，土壤能够释放足够的钾供作物吸收利用。

从有效养分损失量和途径看，有效N主要通过径流损失，径流中又以壤中流为主，平均损失量达 $4.19 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，对环境造成了较大压力；雨强对有效N的损失量影响较小，施肥方式对有效N的损失量影响较大，一次性施肥显著加大了有效N的损失，并且主要增大了壤中流有效N损失。有效P损失量很小，平均损失量仅 $0.021 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，对环境污染贡献很小，并主要通过泥沙损失，因此，受雨强的影响较大，雨强越大，有效P损失量显著增加，施肥方式对P的损失量影响小。有效K的损失途径主要是泥沙，雨强越大，有效K损失量成倍增加，施肥方式对K总损失量影响不大。

从总养分损失量和载体看，N的主要损失载体是径流，平均损失量达 $5.08 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，对环境造成了较大压力；并且受雨强影响小，受施肥方式影响大，一次性施肥显著加大了N的损失。P损失的主要载体是泥沙，受雨强影响大，雨强越大，P损失量显著增加，而受肥方式影响小。K损失的主要载体也是泥沙，平均损失量达 $29.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，雨强越大，K损失量成倍增加，施肥方式对K总损失量影响不大。

#### 4 结论

在紫色土地区，N损失的主要载体是径流，特别是壤中流，P、K损失的主要载体是侵蚀泥沙。一次施肥显著增加了玉米生育前期壤中流N浓度，显著加大了氮的损失，造成土壤

对玉米生育后期供肥不足,使玉米减产。在紫色土地区,不仅要采用分次施肥等施肥技术控制P、K和部分N损失,还要采用增厚土层、提高土壤有机质含量等土壤改良措施,提高土壤蓄水保肥能力,才能更全面控制紫色土的氮、磷、钾损失。

**鸣谢:** 作者感谢国家科技支撑计划(项目编号:2008BAD98B03和2006BAD05B06)、国际植物营养研究所、及四川省科技厅应用基础项目(项目编号:2008JY0022-1)的资助。

#### 参考文献

- [1]Onema O, Roset J C W. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface water: the effects of policies and measurements in the Netherlands[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37:19-30.
- [2]邱伦,李佩武. 降雨过程与氮、磷流失特征研究. *环境科学学报*,1996,16(1):111-115.
- [3] 史德明.土壤侵蚀对生态环境的影响与防治对策.*水土保持学报*,1991, 5(3):1-8.
- [4]何毓蓉.中国紫色土(上).北京:科学出版社,2003.
- [5]吕甚悟, 王世平, 徐多润.紫色土坡耕地耕作方式对土壤侵蚀影响的试验研究, *中国水土保持*, 1996, 2:38-42.
- [6]傅涛, 倪九派, 魏朝富.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究, *植物营养与肥料学报*, 2003,9(1):71-84.
- [7]许峰, 蔡强国, 吴淑安.高等植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点.*土壤学报*,2002, 39(1):71-80.
- [8]王亮, 何丙辉.人工模拟降雨条件下紫色土养分流失规律分析.*西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(1): 145-149.
- [9]李仲明, 唐时嘉, 张先婉. 中国紫色土. 北京: 科学出版社, 1991.
- [10]张信宝, 朱波, 张建辉, 文安邦, 刘邵权. 地下地膜截水墙-一种新的节水农业技术.*山地学报*, 1999,17(2): 115-118. (in Chinese)
- [11]高扬, 朱波, 周培, 汪涛, 缪驰远.紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1371-1376.
- [12]罗在波. PAM对紫色土坡地氮素迁移淋失的控制效应. 重庆: 西南大学, 2008.
- [13] 腾玲玲. PAM对紫色土坡地土壤磷素流失的控制效应与机理分析.重庆: 西南大学, 2008.
- [14]林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 庞良玉. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2241-2249.
- [15]林超文, 庞良玉, 罗春燕, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 张鸿. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响. *生态学报*, 2009, 29(10): 5552-5560.
- [16]高强, 李德忠, 汪涓涓, 白百一, 黄立华. 春玉米一次性施肥效果研究. *玉米科学*, 2007, 15(4):125-128.

- [17]吴景贵, 任成礼, 代静玉, 姜亦梅, 丛嘉厚, 王兴远. 玉米一次性分层施肥技术研究[J]. 土壤肥料, 1995 (1) : 29-31.
- [18]张建华. 紫色丘陵土壤保护示范区气候资源及评价. 土壤农化通报, 1992, 7(1-2): 96-104.
- [19]林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华. 四川间作地区作物高度、覆盖度和叶面积指数的动态变化. 生态学杂志, 2007, 26 (7) : 989-994.
- [20]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 1999. 125~195.
- [21]许锋, 蔡强国, 吴淑安, 张光远. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 23-29.
- [22]许锋, 蔡强国, 吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展. 水土保持学报, 2000, 14(1): 82-87.
- [23]黄丽, 丁树文, 董舟, 蔡强国, 张光远. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 8-12.
- [24]蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 刘玉民. 紫色土坡地不同种植模式下径流及养分流失研究. 水土保持学报, 2004, 18(5): 54-58.