

玉米种植下紫色坡耕地径流中磷素流失特征研究

何晓玲¹, 郑子成^{1,2*}, 李廷轩¹

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用人工模拟降雨装置,通过野外径流小区试验,研究了紫色土坡耕地玉米生长季磷素流失特征。结果表明:(1)地表径流占总径流的比例较大,其中平作地表径流占总径流量的80%~83%,地表径流磷素流失量占总流失量的64%~88%;顺坡垄作分别为84%~87%和79%~87%,横坡垄作分别为71%~87%和52%~88%。(2)各耕作措施下总径流量在拔节期和抽雄期较苗期和成熟期小,且径流中磷素流失以DTP(可溶性磷)流失为主。(3)在3种耕作措施中,平作地表径流量及磷素流失总量最少;横坡垄作壤中流损失最大,是平作和顺坡垄作的1.1倍,其磷素流失总量也最严重,是平作的2倍、顺坡垄作的1.9倍。对于零散坡耕地而言,合理的耕作措施对磷素流失的调控具有一定作用,但有别于其他类型坡耕地。

关键词:玉米;耕作措施;坡耕地;磷素流失

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)12-2441-10

Phosphorus Loss via Runoff from Sloping Cropland of Purple Soil Under Corn Planting

HE Xiao-ling¹, ZHENG Zi-cheng^{1,2*}, LI Ting-xuan¹

(1.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: A field trial on the maize sloping plots were carried out to investigate characteristics of phosphorus loss in runoff of sloping cropland in purple soil during the maize growing season using artificial rainfall simulation device. The results showed that: (1) The surface runoff flow was a large portion of the total. Surface runoff flow of flat planting accounted for 80%~83% of the total, whereas the phosphorus loss accounted for 64%~88% of the total. Moreover, longitudinal ridge accounted for 84%~87% and 79%~87% and cross ridge accounted for 71%~87% and 52%~88%, respectively. (2) The total runoff flow in the elongation stage and tasseling stage were less than in the seedling stage and maturation stage for the three tillage practices. And phosphorus losses in runoff were mainly in DTP(dissolved total phosphorus). (3) The runoff flow and phosphorus loss of flat cultivation was lower than the other two tillage practices. Conversely, the subsurface runoff flow of cross ridge was the highest, which was 1.1 times higher than the other two tillage practices. Moreover, the phosphorus loss of the cross ridge was extremely serious, which was 2.0 times and 1.9 times higher than the flat planting and longitudinal ridge, respectively. Thus, reasonable farmland measures had a certain function to phosphorus regulation for the scattered sloping cropland, but which was different from other types.

Keywords: corn; tillage practice; slope cropland; phosphorus loss

收稿日期:2012-05-20

基金项目:国家自然科学基金(40901138,41271307);国家科技支撑计划子课题(2008BAD98B03);四川省科技厅应用基础项目(2010JY0083);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室(10501-283);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目

作者简介:何晓玲(1986—),甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事土壤生态与水土保持方面的研究。E-mail:he4231113@126.com

*通信作者:郑子成 E-mail:zichengzheng@yahoo.com.cn

坡耕地土壤磷素流失过程是土壤与降雨、径流相互作用的结果,它可以通过降雨(灌溉)-地表径流携带进入到水体,或者以渗漏、淋失等形式通过土壤剖面下渗到地下水进而运移到受纳水体中^[1],造成水体富营养化。近年来,由于磷肥大量投入,不仅导致了农田生态系统的磷素流失日趋严重,同时也加速了湖泊等水体富营养化的进程^[2-3]。

紫色土区是四川省农业的主体区域,也是全国主要的农业商品生产基地之一,坡耕地种植以玉米为主。该区土体较薄,是一种侵蚀型的高生产力岩性土^[4-5]。其坡耕地约占四川丘陵区耕地面积的 70%,土壤侵蚀面积之广和侵蚀强度之大,仅次于黄土高原^[6]。前人对该区磷素流失研究主要集中于不同土地利用方式对磷素流失的影响以及小流域尺度上磷素迁移转化特征等^[7-10],且大多集中于裸地磷素流失规律方面,而关于玉米季耕作措施对磷素流失影响的研究较少^[11-15]。各生育期玉米对降雨截流、径流等作用不同^[16],且随着生育期推进,地表覆盖及受雨量均不同,进而影响坡耕地的水土及磷素流失。目前,紫色丘陵区人地矛盾较为突出,但仍存在农户陡坡耕种的零散地块,这些地块具有坡度大、面积小等特点,再加上农业生产中不合理的耕作造成坡耕地强烈的水土资源及磷素的流失^[17],而关于紫色土区零散小地块在降雨径流过程中的磷素流失的研究鲜见报道。因此,本研究以川中紫色丘陵区零散耕地为研究对象,通过微小区模拟试验法,开展玉米季耕作措施对磷素流失影响的研究,可为紫色土区坡耕地寻求合理防护磷素流失时期提供一定理论基础,以期服务于紫色土区农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区域位于长江上游沱江水系花椒沟小支流的响水滩上端,处于 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,平均海拔 395 m,该区属亚热带季风气候,年平均气温 17 ℃,一年中降水分配极不均匀,年均降雨量 965.8 mm,暴雨主要发生在 6—10

月。年日照时数 1300 h,年均无霜期长达 300 d。研究区坡耕地以玉米种植为主,辅以种植白菜、芋头、海椒等,玉米按照当地实际情况,每 666.7 m²栽培约 2700 株。土壤为遂宁组母质发育的紫色红砂土,质地较轻,土壤肥力较低,其理化性质见表 1。

1.2 供试材料

本研究供试玉米品种为当地主栽的川单 13,于 2011 年 4 月上旬播种,行距 80 cm,株距 30 cm。播种前基施氮肥(N)和磷肥(P₂O₅)分别为 250 kg·hm⁻²和 125 kg·hm⁻²,氮肥为尿素(含 N 46.3%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),其中氮肥兑清水灌窝,磷肥干施于植株窝内,并在拔节前追施氮肥(N)150 kg·hm⁻²,其他管理措施均按当地农耕习惯进行。

1.3 研究方法

采用人工模拟降雨法。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 6 m,降雨均匀系数在 85%以上。降雨前进行仪器调试与降雨率定,并准确记录坡面产流时间。根据试验区多年水文资料记录的降雨频率及特点,本研究降雨强度确定为 1.7 mm·min⁻¹,降雨历时为 40 min。

结合野外实地调查,采用微小区方法(2 m×1 m),坡度设置为 20°。小区下垫面用混凝土固化防渗形成相对不透水层(保持与土面相同坡度),使渗入土体中的水分到达此相对不透水层时,可通过挡板上直径为 2 cm 的小孔流入集水槽。相对不透水层上铺 10 cm 厚石英砂,上面覆土 60 cm(过 10 mm 筛),填埋土壤容重控制在(1.3±0.1)g·cm⁻³。每个小区坡面下部用水泥砌成 V 形集水槽,集水槽通过 PVC 管连接到径流收集桶。按照当地农耕习惯,设置横坡垄作、顺坡垄作、平作 3 种耕作方式,重复 3 次,共计 9 个小区,试验分别在玉米苗期、拔节期、抽雄期、成熟期进行。

降雨产流后准确记录产流时间,用塑料桶收集径流,壤中流收集总量,地表径流每 3 min 收集一次,直至产流结束。产流结束后,用体积法测得壤中流总体积,地表径流桶放置澄清后倒出,用体积法测定径流体积。收集上部清液于 100 mL 塑料瓶中,收集两瓶,

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Soil physical and chemical properties

pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
8.1	7.34	0.91	0.80	18.80	100.36	6.26	134

加硫酸调 $\text{pH} \leq 1$, 存放于冰箱 (-21°C) 冷冻, 待测。总磷 (TP) 测定参照 GB/T 1893—1989 的钼酸铵分光光度法; 可溶性总磷 (DTP) 测定采用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 参照 GB/T 1893—1989 的钼酸铵分光光度法; 颗粒态磷 (PP) 据差减法 (总磷-可溶性总磷) 求得。

1.4 数据处理及分析

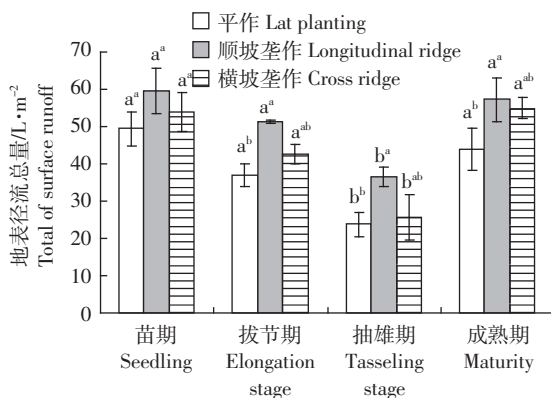
试验数据统计分析采用 DPS (11.0) 软件, 其中方差分析采用两因素完全随机设计, 多重比较选择 LSD 法; 图表制作采用 Excel (2003)。

2 结果与讨论

2.1 次降雨径流变化特征

2.1.1 地表径流总量的变化特征

由图 1 可知, 在玉米季各时期坡耕地地表径流总量的分布极不均匀, 随着生育期推进, 呈先减小后增加的变化趋势, 除苗期外其他 3 个时期中平作和顺坡垄作径流量达到显著水平。平作和顺坡垄作的径流量在苗期最大, 各占径流总量的 32% 和 29%; 横坡垄作地表径流量在成熟期达到峰值。3 种耕作措施地表径流量均在抽雄期显著小于其他时期, 分别占 4 个时期总地表径流量的 15%、17% 和 14%, 主要由于这一时期玉米植株覆盖度最大, 大量雨水被截流, 从而延缓地表产流时间^[18-19], 故地表径流总量最小。当玉米植株将至成熟期, 玉米叶片逐渐枯损, 植株对地表的保护



柱上不同小写字母表示同一措施不同时期在 $P \leq 0.05$ 水平上差异显著; 上标不同小写字母表示同一时期不同措施间在 $P \leq 0.05$ 水平上差异显著。下同
Different letters indicate significant level at $P \leq 0.05$ among different growing season; Different superscript letters indicate significant level at $P \leq 0.05$ among different tillage practices. The same below

图 1 玉米生长季不同耕作措施下地表径流总量

Figure 1 Total of surface runoff to different tillage practices during the corn growing season

能力逐渐丧失, 地表径流量又呈增加的趋势。在同一时期条件下, 横坡垄作径流量均大于平作, 这是由于坡度较大, 遇到历时较短的大雨时, 雨水迅速汇集于垄沟, 逐渐越过垄台流向下一行垄沟, 从而出现部分的断垄, 径流流速增加, 在坡面局部形成了细沟。

2.1.2 地表径流过程特征

由图 2 可知, 玉米季地表径流随降雨延续呈缓慢增加趋势, 并逐渐趋于稳定。由于垄沟的沿坡面积水作用使各时期中顺坡垄作最早产流, 其地表径流总量也最大。苗期玉米植株矮小, 小区有效承雨面积大, 致使各措施下地表径流产流时间较其他时期早, 均在降雨后 3 min 左右开始产流。拔节期在降雨开始后的 3~15 min 内, 径流迅速增加, 在 16 min 左右时各措施下产流量均有明显的减少, 随后缓慢上升, 最终趋于稳定。玉米抽雄期对地表的覆盖最大, 所以各措施下产流时间最晚, 在降雨开始 4~5 min 后才开始产流, 顺坡垄作产流率明显高于其他措施。由于前期降雨形成部分浅沟和细沟, 成熟期径流量在产流初期增加较明显, 随后产流呈稳定增加趋势, 加之横坡垄作上存在部分断垄现象, 产流 15 min 后顺坡垄作和横坡垄作的径流变幅差异较小。

2.1.3 壤中流的季节变化特征

由图 3 可知, 壤中流在不同耕作措施间差异不显著, 而不同时期的壤中流变化较为明显。苗期各措施下壤中流均较大, 主要是由于苗期玉米植株矮小, 地面覆盖度小, 雨水输入量大, 其入渗量也大。随着生育期的推进, 植株的截留作用及地表的覆盖度逐渐增加, 抽雄期平作和顺坡垄作流量显著小于苗期, 与平作和顺坡垄作相比横坡垄作产生的壤中流较多, 主要是由于茎秆流的不断积聚, 一部分直接渗入土体, 另一部分被拦蓄于垄沟内, 增加了潜在的入渗量^[18]。

2.2 次降雨地表径流中磷素流失特征

2.2.1 地表径流中总磷的流失特征

由图 4 可知, 除抽雄期外不同耕作措施间 TP 流失总量差异不显著, 抽雄期横坡垄作显著高于平作, 是平作流失量的 2.1 倍, 主要因为随着垄沟中沉积物和积水厚度的增加, 水体缺氧加速了底质磷释放^[20], 在降雨后期垄坡上出现断垄甚至冲刷沟时, 大量磷素随径流作用而流失。随着玉米生育期的推进, 平作和顺坡垄作条件下 TP 流失量逐渐增大, 其中平作下 TP 流失量在各个时期差异不显著, 顺坡垄作在拔节期的流失量显著低于成熟期, 只占到成熟期的一半。横坡垄作在玉米生长前期 (苗期、拔节期) TP 流失量显著

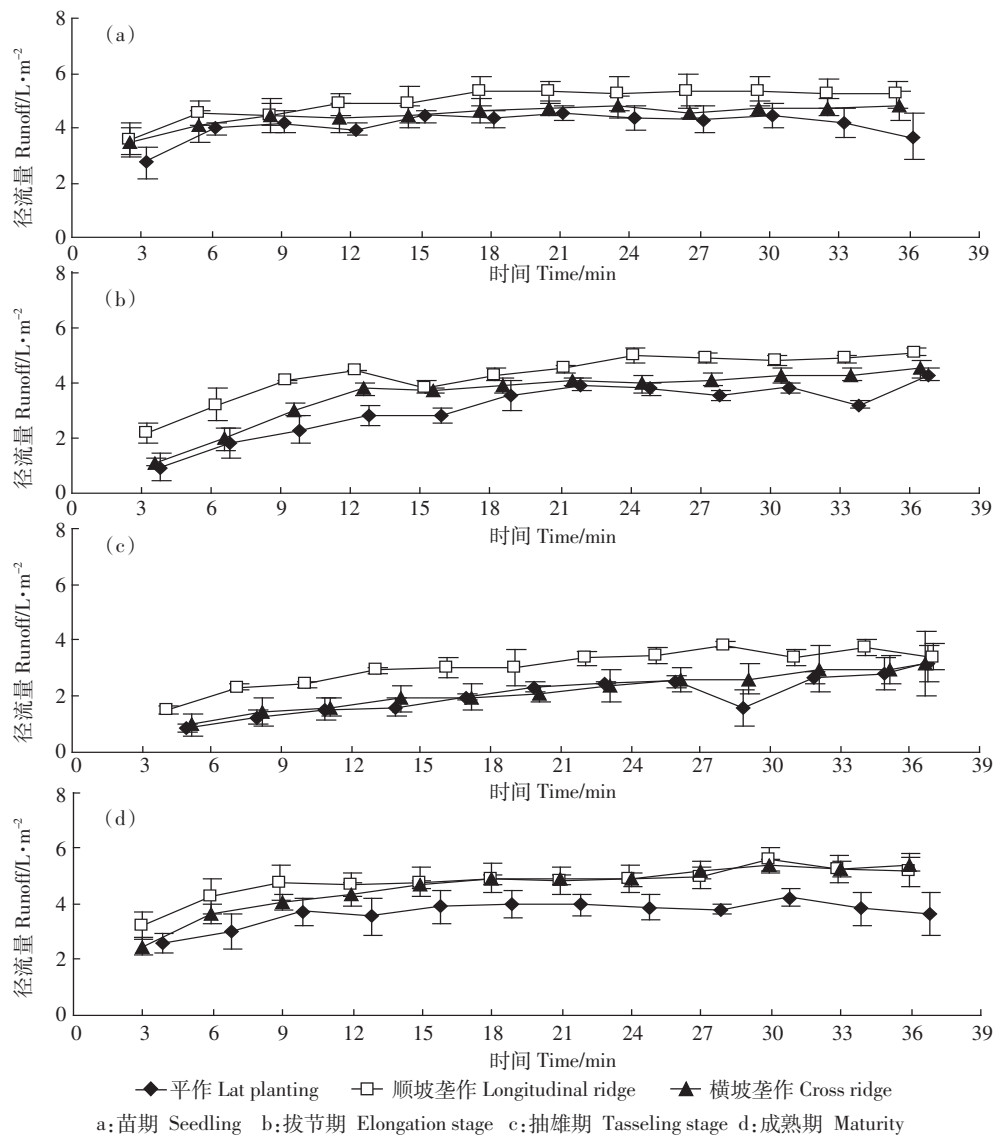


图 2 玉米季不同耕作措施下地表径流动态变化特征

Figure 2 Dynamic variation characteristics of surface runoff to different tillage practices during the corn growing season

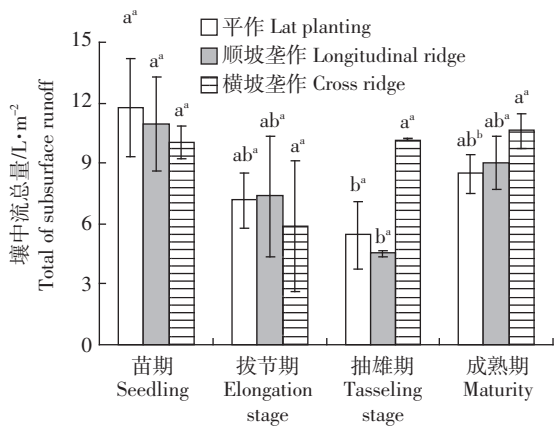


图 3 玉米生长季不同耕作措施下壤中流总量

Figure 3 Total of subsurface runoff to different tillage practices during the corn growing season

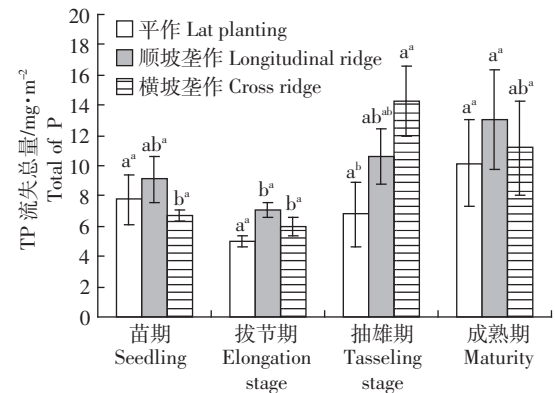


图 4 玉米生长季不同措施下地表径流中总磷流失量

Figure 4 Total of P in surface runoff to different tillage practices during the corn growing season

低于生长后期(抽雄期、成熟期)的流失量,且在抽雄期达到峰值,较苗期、拔节期和成熟期分别高 53%、58%和 27%,说明横坡垄作在抽雄期控制径流作用较好,但对磷素流失的控制效果较差。就其均值而言,各措施在拔节期磷素流失量最少,主要是由于拔节期是玉米干物质积累的主要阶段,此时需要大量的水分和养分。玉米生长后期各措施下 TP 流失较严重。一方面,由于叶片汇集的大雨滴对局部地表破坏程度严重,使得土壤中的磷素被充分浸提出来,而随径流流失;另一方面,从抽雄期到成熟期玉米主要表现为籽

粒干物质的积累,根系对水分的吸收开始明显减少,加之叶面积指数开始减小,径流量不断增大,使得成熟期径流量及磷素流失量均较大。各耕作措施下径流及磷流失总量均表现为顺坡垄作>横坡垄作>平作。可见,对于零散坡耕地而言,平作与横坡垄作控制水土流失作用及磷素流失效果较好,但有别于其他类型坡耕地,这可能与此类地块自身特点有关。

2.2.2 地表径流过程中各形态磷浓度的变化

由图 5 可知,各生育期在产流初期,TP 浓度较高,随产流时间的延续逐渐降低。苗期、拔节期、成熟

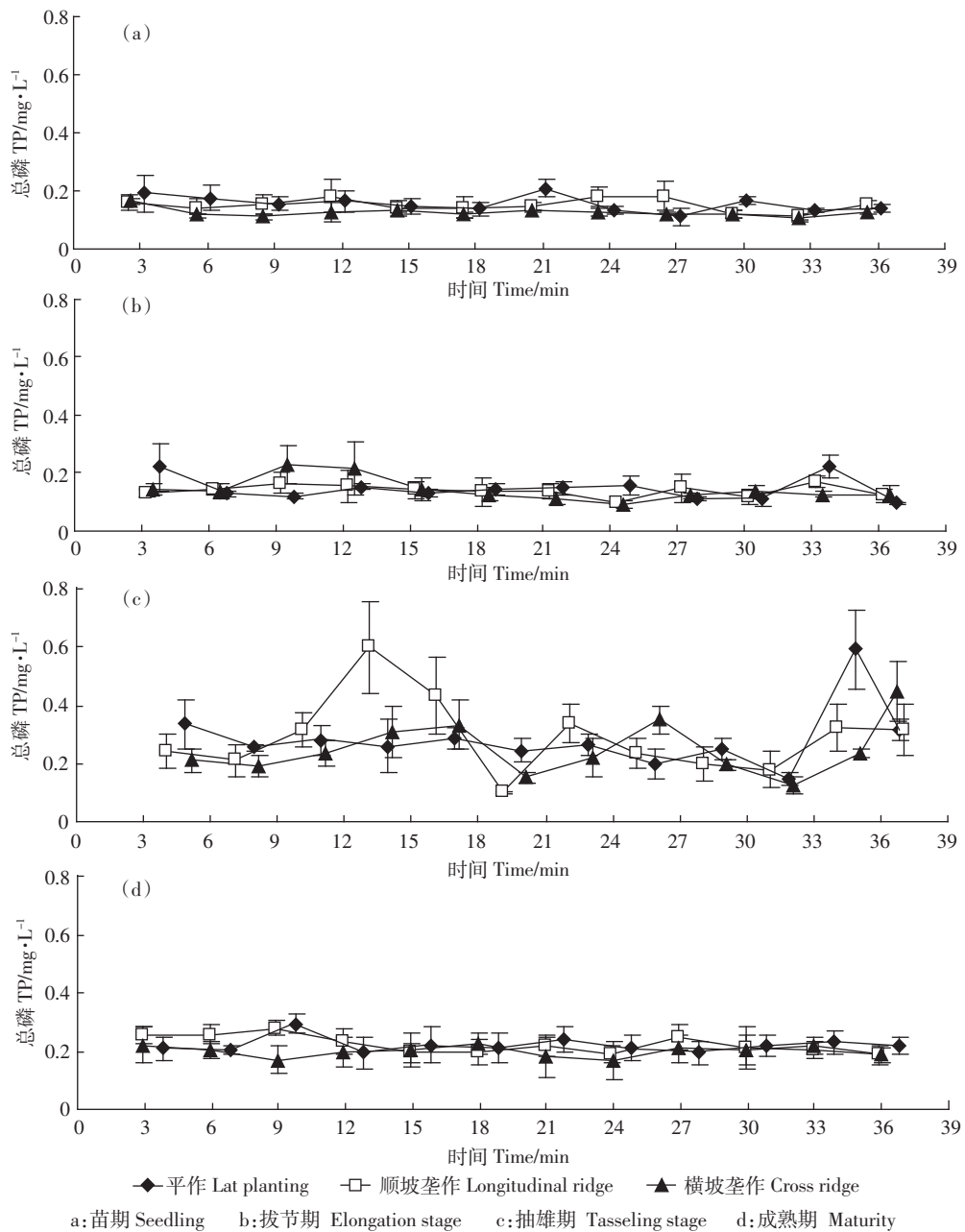


图 5 玉米季不同耕作措施下地表径流中总磷动态变化特征

Figure 5 Dynamic characteristics of TP in the surface runoff of different tillage practices during the corn growing season

期各耕作措施下径流中 TP 浓度变化较稳定,抽雄期径流中 TP 浓度变幅较明显,说明差异并非由耕作措施引起,可能是玉米植株对降雨分配作用所致。

苗期平作下径流中 TP 平均浓度最高,横坡垄作下最低。拔节期和成熟期随降雨径流过程的延续,表现为波浪性下降趋势,3 种耕作措施下径流中磷素平均浓度差异较小。由此可见,耕作措施对径流中磷素平均浓度影响较小。抽雄期玉米生物量较大,叶片对地表遮挡减轻了雨滴对地面的直接打击作用,但是叶尖的大雨滴会对局部坡面产生叠加击溅侵蚀,同时,

由于根系的固土作用以及对土壤养分的吸收,造成径流中磷素浓度随时间呈明显锯齿形变化,其中顺坡垄作波动幅度最大。所以在玉米整个生长季,降雨产生的地表径流中 TP 浓度的变化受耕作措施影响较小,这与林超文等研究结果较为一致^[14]。

已有研究表明^[21-22],土壤 DTP 与土壤颗粒之间存在专性吸附关系,其在径流溶解和冲刷作用下从土壤颗粒上解吸进而流失,一般认为其与径流泥沙间的吸附-解吸作用贯穿于流失的全过程。图 6 径流中 DTP 流失过程的结果表明,DTP 浓度的变化特征与 TP 的

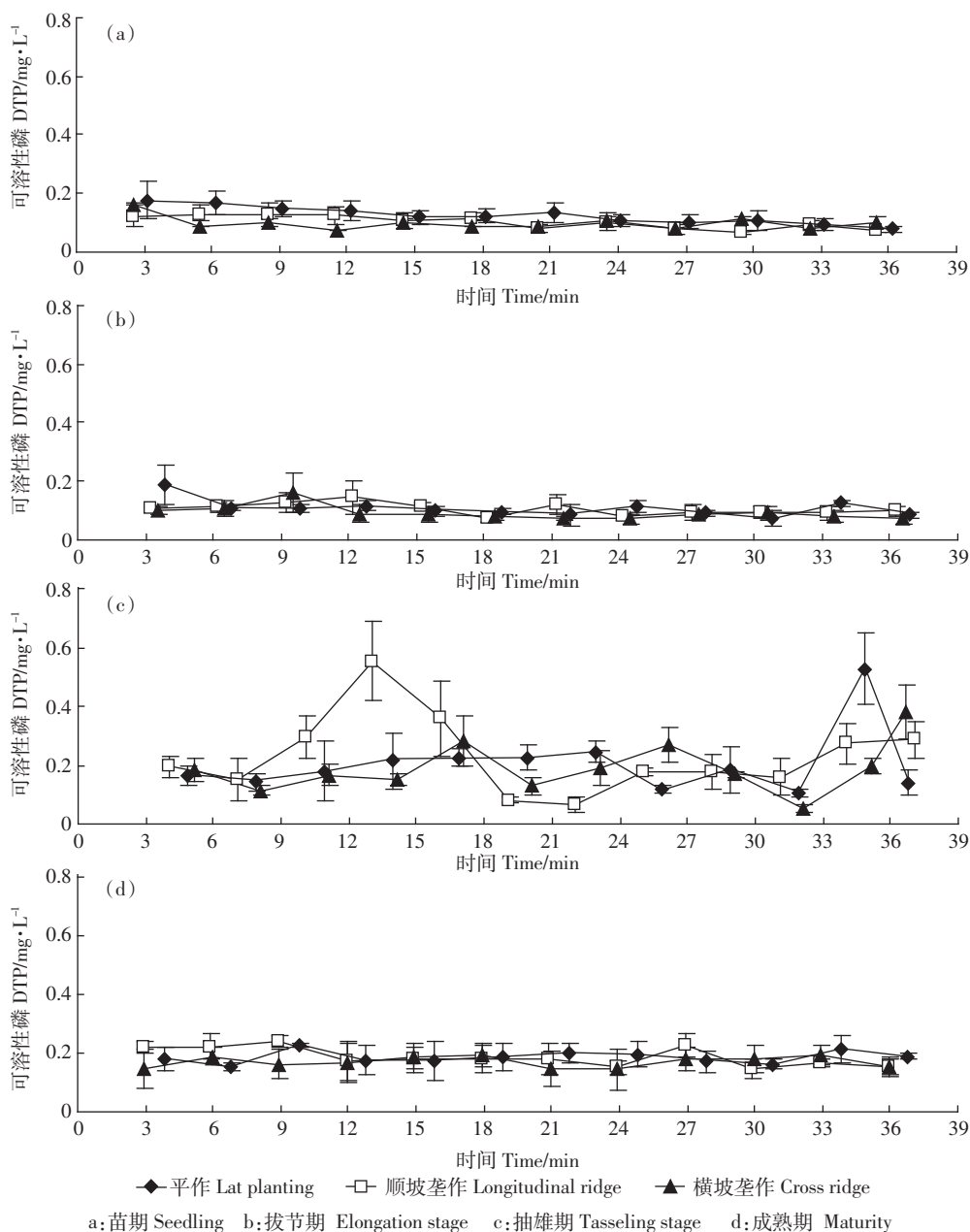


图 6 玉米季不同耕作措施下地表径流中可溶性磷动态变化特征

Figure 6 Dynamic characteristics of DTP in surface runoff of different tillage practices during the corn growing season

基本相似,苗期、拔节期、成熟期的 DTP 浓度变化比较稳定,随降雨径流过程的延续,表现为波浪性下降趋势,起始浓度均高于产流终止时浓度。所以,DTP 随径流流失主要集中在降雨起始阶段。因为产流初期的径流量较小,径流主要作用于土壤上表层,而这层土壤养分含量相对较高,进而使产流初期 DTP 浓度较高。随着径流时间的延续径流逐渐切入较深的土壤层次,与土壤接触逐渐充分,径流的溶解和浸提力也有所增加,虽然径流中 DTP 的含量有所升高,但径流量的迅速增加对磷素流失浓度的稀释作用占据主导,所以,随径流量的增加 DTP 浓度逐渐降低。抽雄期 DTP 浓度随时间呈锯齿形变化,波动较剧烈,终止时浓度略有升高,可能与坡面侵蚀演化及作物根系周围残留的磷肥有关。苗期和拔节期 3 种措施下平均浓度都较小,且差异不大。可见,耕作措施对 DTP 浓度的影响甚微。

DTP 是藻类直接利用的磷素形态,颗粒态磷(PP)虽然为悬浮颗粒所吸收,但在适宜的条件下可向水体释放并转化为生物可利用磷^[23]。所以,PP 随径流水中悬浮颗粒进入河流湖泊沉淀,成为湖泊内源污染的主要因素,严重时可以在切断外源输入的情况下引起水体富营养化。表 2 为降雨条件下 3 种耕作措施下径流中磷素形态流失总量状况,由同一耕作措施不同生育期 DTP 和 PP 流失总量差异可以看出,平作和顺坡垄作 DTP 流失总量均在成熟期显著高于其他时期;平作 PP 在 4 个时期的总流失量差异不显著,顺坡垄作只在苗期和拔节期差异显著;横坡垄作 DTP 流失量在玉米生长后期显著高于前期,PP 流失量在抽雄期显著高于其他 3 个时期。由同一生育期不同耕作措施流失总量差异可以看出,苗期 DTP 的流失量在 3 种措施下均未达到显著性差异,而 PP 流失量则在顺坡垄作下显著高于平作和横坡垄作;拔节期和成熟期

3 种措施下的 DTP 和 PP 流失量均未达到显著性差异;抽雄期平作和横坡垄作 DTP 和 PP 的流失量差异显著。从 DTP 所占 TP 比例来看,平作 DTP 的流失量占 TP 流失量的 72%~84%,顺坡垄作 DTP 的流失量占 TP 流失量的 68%~84%,横坡垄作 DTP 的流失量占到 TP 流失量的 64%~86%,表明坡耕地径流水中 PP 流失量较少,主要是以 DTP 流失为主,这与马琨等^[24]研究结果一致。主要是因为 DTP 的迁移主要是土壤磷素与土壤、径流之间相互作用的一个物理化学过程^[25],而紫色土以蓄满产流为主,土壤中大量的 DTP 被径流充分浸提并随之流失。DTP 和 PP 均在玉米植株生长后期流失较为严重,就横坡垄作而言,抽雄期和成熟期两个时期的流失量占总流失量的 70%,可能是由于次降雨期间形成的部分断垄造成的,所以在横坡垄作的田间管理时要注意沟垄的保护和及时修复。

2.3 壤中流磷素流失特征

由图 7 可以看出,壤中流 DTP 平均浓度的变化与 TP 相似,且壤中流中磷的流失以 DTP 为主。有研究表明,当壤中流中 DTP 含量达到 38%以上时将地下水水质造成威胁^[26]。玉米生长季,平作壤中流中 TP 平均浓度的变化随着玉米生育期推进呈先增大后降低的变化趋势,变化范围为 0.16~0.42 mg·L⁻¹,拔节期达到峰值;顺坡垄作壤中流中 TP 平均浓度介于 0.18~0.32 mg·L⁻¹ 间,在抽雄期达到峰值;横坡垄作壤中流中 TP 平均浓度介于 0.19~0.60 mg·L⁻¹ 间,苗期的流失最严重(是平作和顺坡垄作的 3 倍之多),随着玉米生育期推进其流失量逐渐降低。对于整个生长季磷素流失而言,各个措施下 DTP 浓度均较高,DTP 占 TP 的比例在平作下为 53%~95%,顺坡垄作下为 61%~97%,横坡垄作下为 75%~95%,对研究区地下水造成了潜在的威胁。壤中流 TP 和 DTP 平均浓度大小依次为横坡垄作>顺坡垄作>平作,这可能与零散地块特点

表 2 玉米季不同耕作措施下地表径流中不同磷素形态流失量(mg·m⁻²)

Table 2 Loss amounts of phosphorus forms in surface runoff of different tillage practices during the corn growing season(mg·m⁻²)

生育期 Growth stage	平作 Flat planting		顺坡垄作 Longitudinal ridge		横坡垄作 Cross ridge	
	可溶性磷 DTP	颗粒态磷 PP	可溶性磷 DTP	颗粒态磷 PP	可溶性磷 DTP	颗粒态磷 PP
苗期 Seedling	6.25ab ^a	1.53a ^b	6.15b ^a	2.96a ^a	5.09b ^a	1.59b ^b
拔节期 Elongation stage	3.65b ^a	1.40a ^a	5.35b ^a	1.74b ^a	3.79b ^a	2.17ab ^a
抽雄期 Tasseling stage	5.22b ^b	1.60a ^b	8.51ab ^{ab}	2.09ab ^{ab}	11.54a ^a	2.67a ^a
成熟期 Maturity	8.57a ^a	1.58a ^a	10.97a ^a	2.10ab ^a	9.59a ^a	1.58b ^a

注:表中不同小写字母表示同一措施不同时期在 P≤0.05 水平上差异显著;上标不同小写字母表示同一时期不同措施间在 P≤0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different letters indicate significant level at P≤0.05 among different growing season; Different superscript letters indicate significant level at P≤0.05 among different tillage practices. The same below.

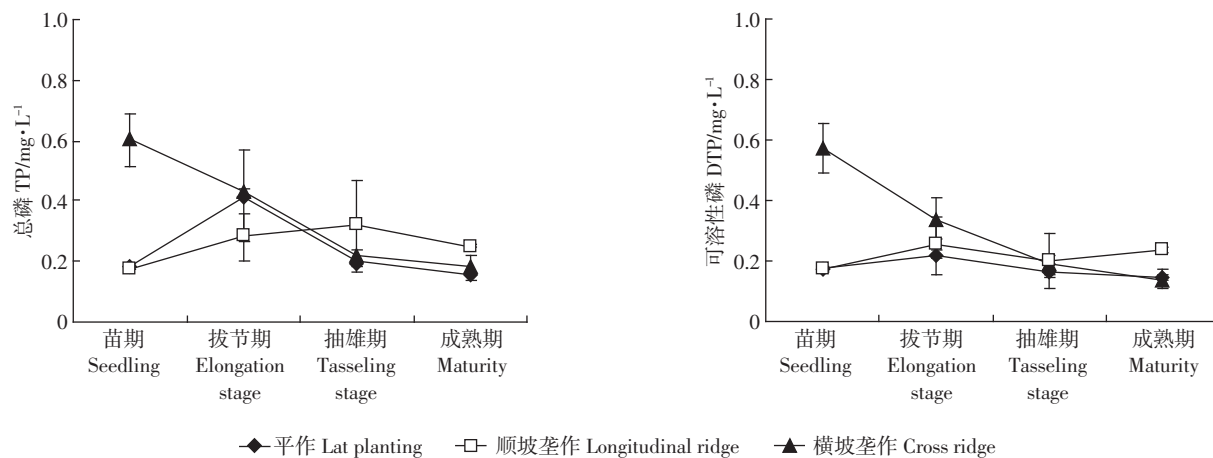


图 7 玉米季不同耕作措施下壤中流磷素浓度特征

Figure 7 P concentration in subsurface runoff of different tillage practices during the corn growing season

有关。在玉米整个生长季横坡垄作下壤中流中磷素浓度最高,是因为横向起垄改变了农作系统的微地貌,延长了降水在地表的停留时间,使土壤中磷素在向下淋溶过程中充分释放。

壤中流中 TP 和 DTP 流失量随着生长期的推进呈逐渐降低趋势,主要由于大量的磷被地表径流携带而流失(图 8)。平作和顺坡垄作的 TP 和 DTP 流失量在各时期差异不显著,而横坡垄作的 TP 和 DTP 苗期的流失量明显高于其他时期,这说明苗期横坡垄作下磷素更易淋失。拔节期平作 TP 总量占地表径流的比例最大为 55%,成熟期最小为 14%;顺坡垄作的 TP 总量在各生育期之间变化不大;横坡垄作下苗期和拔节期占地表径流中 TP 总量比例较大,分别为 90%和 67%,这可能与残留土壤中磷肥有关,其余两个时期均为 17%。壤中流中磷素含量不仅与壤中流量的多少有关,还与土壤剖面底层的磷素含量及其饱和度密

切相关^[26]。有研究表明,在大雨强时,尤其在土壤饱和后,土壤壤中流更多的是受植物根系分布的影响,根系分布明显促进土壤中水分和溶质的导量^[27],且横坡垄作壤中流流量及其磷素的流失量在各个时期均较大,平作和顺坡垄作的流失量差异较小。由于玉米根系发达,在降雨过程中易于土壤内部的导流,利于水分下渗,而在玉米根系周围残留大量前期施入未被吸收利用的磷肥,壤中流磷素浓度普遍高于地表径流中磷素浓度。但在本研究条件下,由于壤中流总量较少,最大壤中流仅占相应地表径流的 24%,所以由壤中流带走的磷素总量相对较少。可见,在紫色土区零散地块径流磷流失主要以地表径流为主,Adelaide 等^[28]也曾得出相似的结论。

3 结论

(1)在紫色土区零散小地块上,玉米苗期和成熟

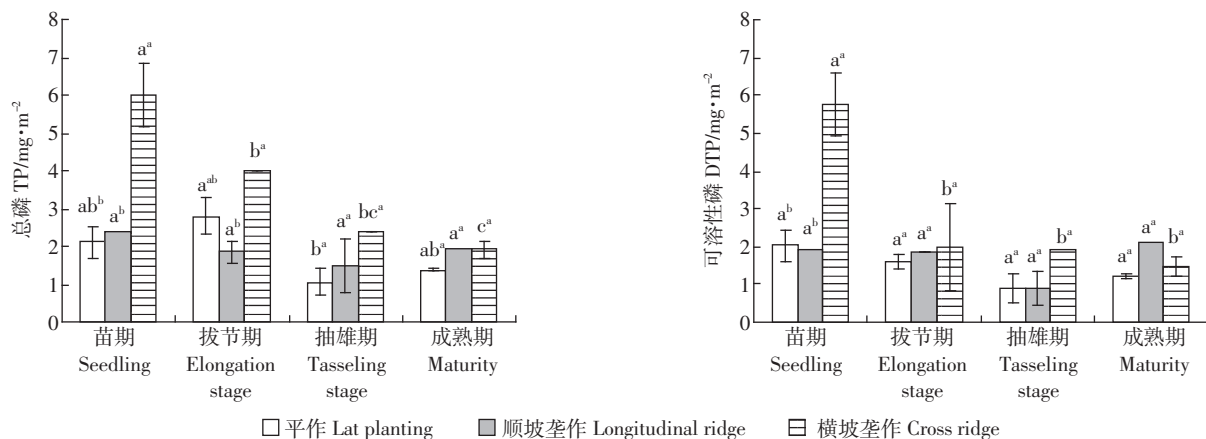


图 8 玉米季不同耕作措施下壤中流磷素流失总量特征

Figure 8 Total P loss via subsurface runoff in different tillage practices during the corn growing season

期地表径流量较大,抽雄期最小。从总流失量来看,横坡垄作控制水土流失效果较平作差,顺坡垄作下的径流量和磷素流失总量均较大;地表径流动态变化随降雨时间延续呈波浪形缓慢增加趋势,而磷素浓度则成缓慢降低趋势,且磷素浓度的变化受耕作措施的影响不大。

(2)壤中流总流量相对于地表径流较小,各措施下差异不显著,但其磷素含量却很高,是地表径流中磷素浓度的1.2~1.4倍。横坡垄作在玉米生长前期(苗期、拔节期)控制壤中流磷素流失效果较差,但在玉米生长后期(抽雄期、成熟期)控制壤中流磷素流失效果较好。在玉米整个生长阶段横坡垄作壤中流磷素流失最多,远远高于其他两种措施。

(3)在坡度较大的零散地块上,横坡垄作并不是一种综合效益很好的耕作措施,相比而言平作控制水土流失及磷素流失效果较好。所以,在实际农业生产中,在较大坡度的耕地上不建议使用横坡垄作,如果使用横坡垄作措施必须在作物生长期及时修补垄沟,以避免叠加侵蚀。

参考文献:

- [1] 曹雪艳,李永梅,张怀志,等.滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J].水土保持学报,2010,24(3):14-17.
CAO Xue-yan, LI Yong-mei, ZHANG Huai-zhi, et al. Differences of phosphorus loss on different soil texture in-situ under simulated rainfall conditions of Dianchi Lake watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 14-17.
- [2] 徐泰平,朱波,况福虹,等.四川紫色土坡耕地磷素渗漏迁移初探[J].农业环境科学学报,2006,25(2):464-466.
XU Tai-ping, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Phosphorus leaching from slope cropland of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 464-466.
- [3] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000,32(4):188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Farmland runoff of nitrogen and phosphorus and water eutrophication[J]. *Soils*, 2000, 32(4): 188-193.
- [4] 高超,朱继业,朱建国,等.不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J].环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1543-1549.
- [5] 尹忠东,苟江涛,李永慈.川中丘陵紫色土区农业型小流域土地利用结构与土壤流失关系[J].农业现代化研究,2009,30(3):360-368.
YIN Zhong-dong, GOU Jiang-tao, LI Yong-ci. Relationship between land use structure and soil losses watershed of central hill region of Sichuan basin [J]. *Research Agriculture Modernization*, 2009, 30(3): 360-368.
- [6] 徐泰平,朱波,汪涛,等.不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J].水土保持研究,2006,13(6):139-144.
XU Tai-ping, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Nutrient loss from slope cropland of purple soil under different rainfall erosivities [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6): 139-144.
- [7] GAO Yang, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Seasonal change of non-point source pollution-induced bioavailable phosphorus loss: A case study of Southwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 373-379.
- [8] 王洪杰,李宪文,史学正,等.不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J].水土保持学报,2003,17(2):44-50.
WANG Hong-jie, LI Xian-wen, SHI Xue-zheng, et al. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 44-50.
- [9] Wang Yun-qiang, Zhang Xing-chang, Huang Chuan-qin. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2009, 150: 141-149.
- [10] 杨皓宇,赵小蓉,曾祥忠,等.不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响[J].生态环境学报,2009,18(6):2344-2348.
YANG Hao-yu, ZHAO Xiao-rong, ZENG Xiang-zhong, et al. Effects of different farming systems on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in purple hilly region in Sichuan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2344-2348.
- [11] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.
FU Tao, NI Jiu-pai, WEI Chao-fu, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 71-74.
- [12] 周璟,何丙辉,刘立志,等.坡度与种植方式对紫色土侵蚀与养分流失的影响研究[J].中国生态农业学报,2009,17(2):239-243.
ZHOU Jing, HE Bing-hui, LIU Li-zhi, et al. Effect of slope and planting mode on erosion and nutrient loss in purple soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 239-243.
- [13] 林超文,庞良玉,陈一兵,等.不同耕作措施和雨强对紫色土坡耕地降雨有效性的影响[J].生态环境,2008,17(3):1257-1261.
LIN Chao-wen, PANG Liang-yu, CHEN Yi-bing, et al. Effect of different cultivation methods and rain intensity on rain efficiency in purple soil area[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1257-1261.
- [14] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10):2241-2249.
LIN Chao-wen, CHEN Yi-bing, HUANG Jing-jing, et al. Effect of different cultivation methods and rain intensity on soil nutrient loss from a purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2241-2249.
- [15] 徐佩,王玉宽,傅斌,等.紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J].水土保持通报,2006,26(6):14-18.
XU Pei, WANG Yu-kuan, FU Bin, et al. Interflow occurrence characters and their analysis on slope cropland with purple soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6): 14-18.

- [16] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2608–2615.
LIN Dai-jie, ZHENG Zi-cheng, ZHANG Xi-zhou, et al. Study on the effect of maize plants on rainfall redistribution processes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12): 2608–2615.
- [17] 郭 跃. 川中丘陵区土壤侵蚀的特征与行为方式[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 9–12.
GUO Yue. Characteristics and pattern of soil erosion in central hills Sichuan basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 9–12.
- [18] 马 波, 吴发启, 陈 宇, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 118–123.
MA Bo, WU Fa-qi, CHEN Yu, et al. Characteristic and model building of stem flow of corn plant in different growth stages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2011, 27(1): 118–123.
- [19] 江才伦, 彭良志, 曹 立, 等. 三峡库区紫色土坡地柑橘园不同耕作方式的水土流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 26–31.
JIANG Cai-lun, PENG Liang-zhi, CAO Li, et al. Correlation between farming methods and soil erosion in the purple soil slope of citrus orchard in the Three Gorges reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 26–31.
- [20] 韩沙沙, 温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 98–101.
HAN Sha-sha, WEN Yan-mao. Phosphorus release and affecting factors in the sediments of eutrophic water[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2): 98–101.
- [21] 张 燕, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域农田径流磷素流失的土壤影响因子[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 41–45.
ZHANG Yan, LI Yong-mei, ZHANG Huai-zhi, et al. The soil factors influencing phosphorus loss by field surface runoff in Dianchi watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 41–45.
- [22] Sharpley A N, Chapra S C, Wodepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 437–451.
- [23] 华兆哲, 朱晓青, 王晓蓉. 太湖沉积物磷释放对羊角月芽藻的生物可利用性研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 100–105.
HUA Zhao-zhe, ZHU Xiao-qing, WANG Xiao-rong. Study on bioavailability of *Selenastrum capricornutum* influenced by released phosphorous[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(1): 100–105.
- [24] 马 隰, 王兆寨, 陈 欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16–19.
MA Kun, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3): 16–19.
- [25] 徐泰平, 朱 波, 况福虹, 等. 平衡施肥对紫色土坡耕地磷素径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 1055–1059.
XU Tai-ping, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of balanced fertilization on phosphorus loss by runoff from slope cropland in purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 1055–1059.
- [26] McDowell R W, Sharpley A N, Withers P. Indicator to predict the movement of phosphorus from soil to subsurface flow[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(7): 1505–1509.
- [27] 高 扬, 朱 波, 周 培, 等. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1371–1376.
GAO Yang, ZHU Bo, ZHOU Pei, et al. Non-point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1371–1376.
- [28] Adelaide Gaynor L D, Finglay W L. Soil phosphorus loss in conservation and conventional tillage in coproduction[J]. *Journal Environment Quality*, 1995, 24: 734–741.