

人工降雨条件下耕翻面积对水土流失的影响

李龙¹, 郝明德^{1,2}, 王安¹, 董晓兵¹, 曹静静³, 武东波³, 肖庆红³

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100, 3. 宁夏农业综合开发办公室, 宁夏 银川 750011)

摘要: [目的] 探讨耕翻面积对水土流失的影响, 为黄土高原地区农田水土流失防治提供依据。[方法] 通过人工模拟降雨试验, 研究了 3 种坡度下不同耕翻面积的产流和产沙特性。[结果] 耕地的产流和产沙特征除了与坡度、雨强以及土壤前期含水量等因素有关外, 还与耕翻面积有密切关系。坡度相同时, 随耕翻面积的增加初始产流逐渐延后; 耕翻面积相同时, 随着坡度的增大径流量有增大的趋势, 在坡度 15° 的情况下, 耕翻 50% 时径流量最大。相同坡度下, 随耕翻面积的增加, 产沙量呈持续上升趋势; 坡度为 10° 时, 耕翻面积对产沙量的影响表现最为明显, 翻耕的产沙量平均为不耕翻的 8.66 倍。15° 坡度下径流量对累积产沙量的影响最显著。不同耕翻面积下的产流率在产流开始后 10 min 左右趋于稳定。在不同坡度下全耕的产沙率均最大, 不耕翻的最小。[结论] 随着耕翻面积逐渐增大, 初始产流时间逐渐延后, 径流量逐渐减小, 产沙量逐渐增大。

关键词: 耕翻面积; 水土流失; 人工降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0034-05

中图分类号: S157.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.072

Effects of Ploughing Area on Soil and Water Loss Under Stimulated Rainfall Conditions

LI Long¹, HAO Mingde^{1,2}, WANG An¹,

DONG Xiaobing¹, CAO Jingjing³, WU Dongpo³, XIAO Qinghong³

(1. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi

712100, China; 3. Ningxia Comprehensive Agricultural Development Office, Yinchuan, Ningxia 750011, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to investigate the effects of ploughing area on soil and water loss, in order to provide basis for soil and water loss in Loess Plateau. [Methods] By artificial rainfall experiments, we studied runoff and sediment yield characteristics at three different slopes with different ploughing area. [Results] The runoff and sediment yield characteristics of cultivated land were not only related to the slope, rainfall intensity and soil moisture content, but also closely related to ploughing area. Under the same slope gradient, the initial runoff occurring time was delayed and the sediment yield was increased with the increase of ploughing area. Under the same ploughing area, runoff and sediment yield rate showed an increasing trend with the increase of slope gradient. And runoff reached to the maximum when the slope was 15° and the ploughing area was 50%. Under the same gradient, the sediment yield showed an increasing trend with the increase of ploughing area. When the slope gradient was 10°, ploughing area had the greatest influence on sediment yield, and the average sediment yield of ploughing treatment was 8.66 times of no-till treatment. The runoff had the most significant influence on the cumulative sediment yield when the slope gradient was 15°. Runoff rate under different ploughing area became stable approximately 10 min after the initial runoff occurring. Under different slope gradient, sediment production rate of full-tillage was the largest in whole-ploughing, while the smallest in no-till. [Conclusion] With the increasing of ploughing area, the initial runoff occurring time is delayed, runoff decreased, and the sediment yield increased.

Keywords: ploughing area; soil and water loss; artificial rainfall

收稿日期: 2014-07-24

修回日期: 2014-08-07

资助项目: 国家科技支撑计划重大项目“农田水土保持关键技术与示范农田水土保持工程与耕作关键技术研究”(2011BAD31 B01); 宁夏农业综合开发科技推广项目(NTKJ-2013-03-1)

第一作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 研究方向为农田水土保持。E-mail: lilong8580@163.com。

通信作者: 郝明德(1957—), 男(汉族), 陕西省华县人, 学士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田生态系统生产力研究。E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn。

免耕是保护性耕作的重要组成部分,它减少了土壤的人为扰动和机械压实,有利于土壤结构的稳步发育,使土壤具有良好的物理结构及适宜的土壤团聚度,且能够较好地贮藏和释放养分,从而提高土壤的保水保土性能^[1-5]。但是也有报道表明连年免耕会造成土壤紧实化^[6-8],不利于根系发育,同时造成杂草和病虫害的加剧^[9],给农业生产带来负面影响,甚至造成减产^[10-12],另外 Dalal 等^[13]研究表明,免耕 3~5 a 导致表层酸化,影响作物正常生长。耕翻整地可加深活土层,疏通空气,提高了抗旱、抗倒伏能力;土壤上松下实,容纳较多的雨水,起到蓄水保墒的作用^[14-16]。土壤水蚀主要包括土粒分离和迁移,在裸露的地表,雨滴的动能将土壤颗粒分离,在飞溅的水滴和地表径流作用下,土壤颗粒便随径流迁移流失^[17]。水蚀的程度除受降雨强度、坡度、土壤质地及土壤团聚体的稳定性等因素影响以外,还受到土壤表面粗糙度的影响,耕翻面积不同会使表面粗糙度产生很大的差异,进而导致坡面产沙量的不同^[18-20]。可见每种耕作措施都有其特有的功能,常年免耕对于农业发展具有一定的局限性,可持续农业的发展需要综合考虑耕作措施的生态和生产效益。本文比较了不同耕翻面积的产流产沙情况,拟在探讨耕翻面积对水土流失的影响,以期黄土高原地区农田水土流失防治提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅进行,采用组合侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高 16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的 98% 以上,降雨均匀度大于 80%。该降雨系统的降雨强度可调范围为 20~200 mm/h,通过调节回水压力和 4 个阀门可以产生 14 种组合^[21]。

供试土壤为取自陕西省延安市的黄绵土,机械组成如表 1 所示。从野外运回的土壤经过风干后,过 10 mm 孔径的筛网去除石块等杂质并混合均匀。试验所用土槽为长 2 m,宽 0.5 m 的坡度可调式钢槽,土壤填装厚度 30 cm,坡度可调节范围为 0°~30°。装土时,先在槽底垫 10 cm 厚的黄绵土,之后采用分层装土,每次填土深度 5 cm,并适当夯实,将土分 4 次均匀装入土槽,填土厚度共 20 cm,加上 10 cm 厚的底土,土层总厚度达 30 cm。控制土壤容重在 1.31 g/cm³ 左右。降雨开始之前使用 TDR 300 测定土壤含水率,保持土壤含水量在 12% 左右。

表 1 供试土壤的机械组成

粒径/mm	<0.001	0.001~0.05	>0.05
百分比/%	13.8	45.3	40.6

1.2 试验方法

试验以耕翻面积为研究因子设 CK(不耕翻)、耕翻面积为 30%,耕翻面积为 50%,耕翻面积为 70%,全部耕翻 5 个处理,耕翻深度 5 cm,耕翻时均是由土槽中部向两端延伸。设 5°,10°,15°这 3 个坡度,目标雨强 120 mm/h,每场降雨持续 60 min。降雨前进行率定,以保证统一的雨强和开度。产流开始时即进行观测,试验过程中每隔 3 min 收集 1 次土槽出口的径流泥沙样,采用置换法求时段产沙量、含沙量。降雨结束后,用量筒测定径流量,泥沙烘干称重测定产沙量。

2 结果与讨论

2.1 耕翻面积对产流产沙量的影响

2.1.1 耕翻面积对地表径流的影响 相同坡度下地表径流的产生随耕翻面积的增加而减缓,耕翻面积越大,初始产流时间越晚(表 2),CK 时初始产流最快。与 CK 相比,耕翻面积为 30% 时产流时间平均滞后 26%,全耕时平均滞后 4.82 倍。耕翻面积相同时,随坡度的增大,地表径流的产生逐渐加快,坡度由 5°增加到 10°时,产流时间平均加快 51.62%,由 10°增加到 15°时,平均加快 29.63%。耕翻面积越大,产流时间随着坡度变大的增加速率越慢,当坡度从 5°增加到 15°时,CK 下产流时间加快 83.52%,全耕时产流时间加快 43.43%。可见耕翻相较于 CK 能够推迟地表径流的产生,这可能是因为耕翻产生的土块加大了入渗面,在降雨初期雨水的入渗量增加,在地表的汇集成流就相应延后,耕翻面积越大,入渗面越大,产流相应越慢。

耕翻对累积径流量和径流系数的影响相较于初始产流差异不显著,且因坡度的不同而较为复杂。耕翻 30% 时较 CK 没有明显变化,耕翻 50% 时增加显著,当耕翻面积大于 50% 时,径流量出现下降的趋势,这可能是由于在耕翻 50% 时,降雨的入渗作用较大,土壤含水量迅速达到饱和,土壤水分饱和后土壤入渗量很小,而耕翻土块对降雨的截流作用有限,所以产流量达到最大;而当耕翻面积大于 50% 时,土块对降雨的截流作用增大,随之产流量减小;随坡度的增大,耕翻与 CK 之间累积径流量和径流系数的差异趋于显著,这主要是由于坡度越大,坡面径流的势能越大,土壤的水分入渗逐渐减小。

表 2 耕翻面积比对产流时间和径流量的影响

耕翻面积/%	不同坡度产流时间/s			不同坡度径流量/mm			不同坡度径流系数/%		
	5°	10°	15°	5°	10°	15°	5°	10°	15°
CK	182	68	30	74.65	82.16	76.60	62.21	68.47	63.83
30	185	93	42	70.80	80.17	73.81	59.00	66.81	61.51
50	216	69	69	76.98	91.71	102.57	64.15	76.43	85.48
70	347	126	122	67.56	79.33	89.87	56.30	66.11	74.89
100	472	406	267	75.16	90.71	95.56	62.63	75.59	79.63

2.1.2 耕翻面积对累积产沙量的影响 相同坡度下,产沙量随耕翻面积的增加而持续增大,CK 的产沙量最小,全耕的产沙量最大(表 3),这与 Blevins 长期试验研究结果一致^[22]。不同坡度下随耕翻面积的增加产沙量增加显著,耕翻 30%时为 CK 的 1.81 倍,全耕时达到 7.39 倍。可见耕翻相较于 CK 产沙量增加显著,且耕翻面积越大,增幅越大。随坡度的增加,翻耕产沙量较 CK 呈先增加后递减趋势,峰值出现在 10°坡度下,其为 CK 的 8.66 倍,而在 5°坡度下增幅最小,说明耕翻和 CK 之间产沙量的差异在坡度为

10°时表现最明显。

耕翻面积相同时,随坡度的增加,产沙量呈上升趋势。坡度由 5°增大到 10°,CK 的产沙量增幅仅为 41.62%,但耕翻的产沙量则均有大幅增加,全耕时最大,为 CK 的 7.83 倍;坡度由 10°增大到 15°,CK 产沙量的增幅出现明显增加,而耕翻产沙量则出现大幅的下降。说明坡度变化对产沙量的影响在 CK 时随坡度增大而趋于明显,在耕翻时随坡度增大而趋于减弱,在耕翻面积为 70%时坡度变化对产沙量的影响最明显。

表 3 耕翻面积比对累积产沙量的影响

耕翻面积/%	坡度 5°		坡度 10°		坡度 15°	
	产沙量/g	增加百分数/%	产沙量/g	增加百分数/%	产沙量/g	增加百分数/%
0(CK)	267.4	0	378.7	0	1 362.3	0
30	387.6	44.95	2 018.9	433.11	2 269.8	66.62
50	430.7	61.07	2 682.8	608.42	6 741.8	394.88
70	543.6	103.29	4 069.4	974.57	8 384.1	515.44
100	663.7	148.20	5 862.2	1 447.98	9 831.8	621.71

2.1.3 不同坡度下耕翻面积和产流量对产沙量的影响比较 从表 3 可以看出,坡度 5°时产沙量最小,坡度 15°时产沙量最大。产沙量与耕翻面积、坡度和产流量等因素有关,因此可以对不同坡度下产沙量进行多元回归分析,其结果如表 4 所示。

表 4 累积产沙量回归分析

坡度	方程模型 Model			R ²
	常数	径流量	耕翻面积比	
5°	432.575	3.938	-2.340	0.993
10°	1 724.372	55.596	-17.706	0.994
15°	-6 086.348	73.852	92.513	0.968

根据累积产沙量回归分析数据可以建立模型:

$$S = a + b * v + c * p$$

式中: S ——累积产沙量(g); v ——径流量(mm); p ——耕翻面积比(%); a, b, c ——常数。R² 分别为 0.993, 0.994, 0.968, 相关性显著,说明拟合方程的可靠性较高。 $b_{5^{\circ}} < b_{10^{\circ}} < b_{15^{\circ}}$,说明 15°坡度下径流量对累积产沙量的影响最显著。坡度越大,雨滴到达地表

时受到平行于坡面向上的力越大,对坡面土壤的剥蚀作用越强烈,加之在坡度较大时,平行于坡面向下的径流所受到的重力势能较大,其冲刷作用越强烈,对坡面的破坏力更严重,土壤颗粒之间的黏着力减小,两种原因的共同作用使坡面土壤趋于分散,使土粒容易随着径流而损失。

耕翻面积比的系数 $c_{5^{\circ}} > c_{10^{\circ}}$,说明当坡度小于 10°时,随着坡度的增加,耕翻面积对产沙量的影响逐渐减小。 $c_{15^{\circ}}$ 为正值,其符号与 $c_{5^{\circ}}$ 和 $c_{10^{\circ}}$ 相反,可见当坡度为 15°时,耕翻面积比对产沙量的影响机制与坡度为 5°和 10°时不一样。

当坡度较小时,雨滴到达地表时受到平行于坡面向上的力较小,雨滴对坡面的击打作用不容易形成局部结皮而使地表粗糙度发生变化,因此耕翻面积对产沙量的影响比较大;当坡度逐渐变大时,结皮作用逐渐显著,因而耕翻面积对产沙量的影响逐渐变小;当坡度到达一个临界坡度时,结皮量达到最大,径流的冲刷作用使土层表面的粗糙度发生变化,不同耕翻面积下的冲刷力影响作用不同,因而造成耕翻面积比的

系数发生了很大变化。

2.2 耕翻面积对产流产沙过程的影响

2.2.1 耕翻面积对产流过程的影响 5°坡度下 CK、耕翻 30%和耕翻 50%的产流趋势较为一致,产流率均持续 10 min 左右后趋于稳定,耕翻 70%和全耕产流率趋于稳定的时间则为 15 min 左右;坡度 10°和 15°时,不同耕翻面积下产流率均在初始产流开始后持续上升 10 min 后趋于稳定(图 1)。影响降雨稳定径流率的主要因素是坡度和地表粗糙度,坡度越小,雨滴对土壤表面的径流冲刷力越小,土层表面不易形成结皮,耕翻面积越小,地表粗糙度越小,土层表面的

结构越难破坏,难以形成土壤结皮,因而径流量会持续增加。由此可见,坡度越小,耕翻面积越小,稳定产流需要的时间越长。CK 和耕翻 30%的稳定产流率无显著差异,不同坡度下耕翻 30%的稳定产流率均低于 CK。可见,耕翻 30%相较于 CK 对径流强度有一定的减弱;耕翻面积大于 30%时,耕翻的稳定产流率较 CK 有显著增加,且坡度越大差异越显著。耕翻 50%,耕翻 70%和全耕的稳定产流率较为接近,在坡度为 5°时没有明显差异,在坡度为 10°和 15°时耕翻 70%的稳定产流率略低于耕翻 50%和全耕,且在坡度为 15°时三者稳定产流率的差异最为明显。

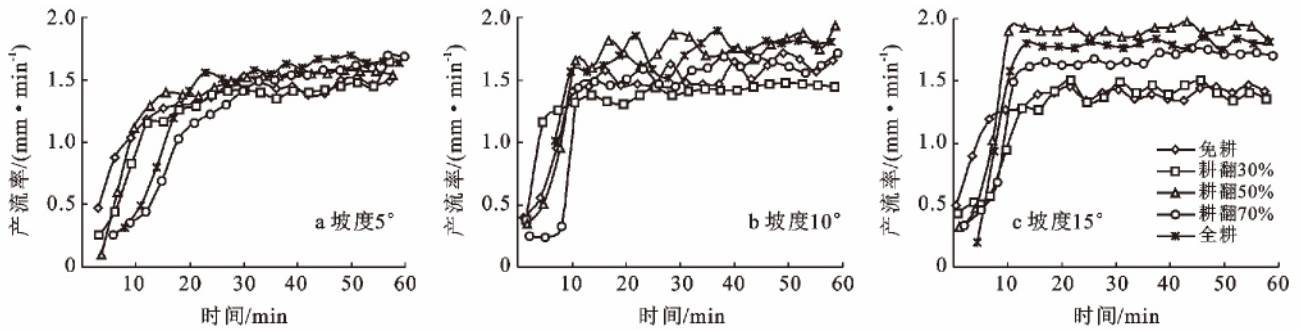


图 1 120 mm/h 雨强下不同坡度产流率随耕翻面积变化趋势

2.2.2 耕翻面积对产沙过程的影响 5°坡度下不同耕翻面积产沙率均呈先上升后下降的趋势(图 2),其中 CK 和全耕产沙率的上升历时 5 min 左右,耕翻 30%,耕翻 50%和耕翻 70%历时 10 min 左右;CK 产沙率的上升幅度最小,但其下降趋势则较耕翻 30%和耕翻 50%明显,全耕和耕翻 70%的上升趋势最明显,下降的幅度也最大,耕翻 30%和耕翻 50%的上升趋势较为一致。耕翻 30%和耕翻 50%的产沙率在整个降雨过程中均较为接近,二者与 CK 之间的差距则随着降雨过程的推进有略微增加;耕翻 70%和全耕的产沙率在降雨中期较为接近,其后全耕的产沙率出现急剧上升,二者之间差距显著增加,在降雨的最后阶段又趋于减小。

当坡度为 10°时,耕翻的产沙率均明显大于 CK 处理。CK,耕翻 30%和耕翻 50%的产沙率在降雨初期均持续上升 10 min 左右,耕翻 70%和全耕则持续上升 5 min 左右,上升幅度随耕翻面积的增加而增大(图 2)。

随着降雨过程的推进,CK,耕翻 30%,耕翻 70%和全耕的产沙率在经历持续上升后表现出较为平稳的态势,总体略微下降;耕翻 50%的产沙率在经历持续上升后下降略为明显,但在降雨中后期又呈小幅上升趋势。降雨中期耕翻 30%和耕翻 50%的产沙率基本相同,但与耕翻 70%的差距显著;降雨后期,耕翻 50%与耕翻 30%的之间产沙率差距增大,与耕翻 70%之间的差距逐渐缩小。

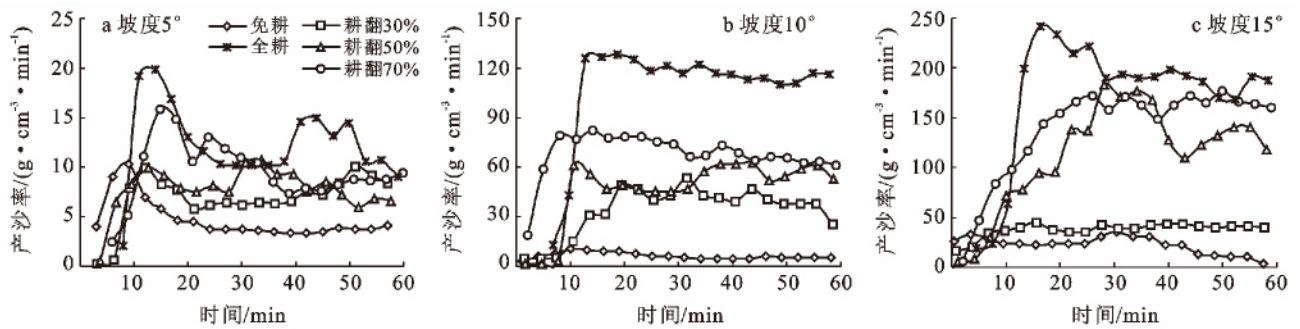


图 2 120 mm/h 雨强下不同坡度产沙率随耕翻面积变化趋势

坡度为 15° 时,耕翻 30% 与 CK 的产沙趋势在降雨初期几乎一致,在降雨后期 CK 的产沙率呈略微下降趋势,二者的差距逐渐加大(图 2)。耕翻 50% 和 70% 的产沙率均持续上升 30 min 左右,但上升趋势较为平缓,30 min 后,耕翻 50% 的产沙率明显回落,耕翻 70% 的产沙率基本不变;全耕产沙率的持续上升过程历时 15 min 左右,上升趋势极为明显,15 min 后,其产沙率均明显下降。耕翻 50%,耕翻 70% 和全耕的产沙率均明显大于 CK 和耕翻 30%,耕翻 70% 和全耕的产沙率在降雨中后期较为接近,耕翻 50% 的产沙率在降雨中期也与二者相差不大,但在降雨后期较二者有明显降低。

地表粗糙度是影响坡面产沙过程的重要因素,在 CK 和耕翻 30% 时,地表的粗糙度比较小,其坡面上径流分布较均匀,加之间或结皮的存在,因此减小了径流集中度,使得径流流速相对较小,一定程度上削减了径流的部分能量,减小了径流对地表土壤冲刷和迁移能力,导致侵蚀产沙变化不大;当耕翻面积大于 30% 时,地表径流变得集中化,增大了流速,进而产生了较大的径流能量,导致大的土壤流失量,故使得侵蚀量变化明显。

3 结论

(1) 模拟降雨条件下,相同坡度时,随耕翻面积的增加初始产流逐渐延后。耕翻面积低于 70% 时,耕翻对初始产流的影响相对较小,全耕时耕翻对地表径流的影响强度最大,坡度越大表现越明显。坡度较小时,随着耕翻面积的增加,径流量出现下降趋势,坡度大于 10° 时,径流量开始增加。

(2) 相同坡度下,随耕翻面积的增加,产沙量呈持续上升趋势。坡度为 10° 时,不同耕翻面积相较于不耕翻产沙量的增幅平均为 8.66 倍,增幅明显大于坡度为 5° 和 15° 时。在耕翻面积小于 50% 时,耕翻的产沙量较不耕翻的增加趋势相对较缓,耕翻面积超过 50% 时,耕翻对产沙量的影响显著增加。

(3) 不同耕翻面积在不同坡度下的产流率在产流开始后 10 min 左右趋于稳定。当耕翻面积小于 30% 时,稳定产流率比较接近,大于 30% 时,稳定产流率明显增加。不耕翻在不同坡度下产沙率均最低。耕翻的产沙趋势在降雨初期经历 5~15 min 的持续上升后出现不同程度的回落,产沙率多在持续上升 10 min 后趋于稳定,降雨中后期产沙率随耕翻面积的增大而增大。全耕的产沙率在不同坡度下均最大,耕翻 30% 的产沙率与不耕翻差距相对较小。

[参 考 文 献]

- [1] 郭贤仕,杨如萍,马一凡,等. 保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4):1-5.
- [2] 孙建,刘苗,李立军,刘景辉,等. 不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤侵蚀的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 485-490.
- [3] Domzal H, Slowinska-Jurkiewica A. Effects of tillage and weather conditions on structure and physical properties of soil and yield of winter wheat[J]. Soil & Tillage Research, 1987, 10(3): 225-241.
- [4] 赵君范,黄高宝,辛平,等. 保护性耕作对地表径流及土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 16-19.
- [5] 魏建兵,肖笃宁,李秀珍,等. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2608-2615.
- [6] 张晓艳. 保护性耕作条件下土壤物理性状及土壤侵蚀研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2008.
- [7] 董智,解宏图,张立军,等. 东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤性状的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 100-103, 108.
- [8] 高婕,李倩,刘景辉,崔凤娟,等. 免耕留茬对内蒙古后山地区油菜田土壤呼吸和水热变化的影响[J]. 作物杂志, 2012, 28(3): 81-85.
- [9] David A M. Ecological management of agricultural weed [J]. Ecology, 2002, 83(7): 2065-2066.
- [10] Cornish P S, Lymbery J R. Reduced early growth of direct drilled wheat in Southern New South Wales: Causes and consequences[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1987, 27(6): 869-880.
- [11] Oussible M, Crookston R K, Larson W E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat[J]. Agron. J, 1992, 84(1): 34-38.
- [12] 郭晓霞,刘景辉,张星杰,等. 免耕对土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 38-42.
- [13] Dalal R L. Long-term effects of no-tillage crop residue and nitrogen application on properties of vertisol[J]. Soil Science Society of Amercal Journal, 1989, 53(3): 1511-1515.
- [14] 马爱生,刘思春,高亚军,等. 旱作农业区土壤水分保蓄状态及其能量特征[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 158-161.
- [15] 崔世明. 耕作方式和土壤水分对小麦产量和水分利用特性的影响及其生理基础[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2009.
- [16] Noel D Uri. The environmental consequences of the conservation tillage adoption decision in agriculture in the United States[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 103(1): 9-34.

(下转第 44 页)

[参 考 文 献]

- [1] 王洪杰,史学正,李宪文,等. 小流域尺度土壤养分的空间分布特征及其与土地利用的关系[J]. 水土保持学报, 2004,18(1):15-18.
- [2] 宋春丽,樊剑波,何园球,等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2012,49(3):607-611.
- [3] 刘海婷,赵阳,于瑞莲,等. 泉州市不同利用方式下土壤磷的吸附与解吸特性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1114-1118.
- [4] 胡艳,夏建国,吴德勇. 川西山地不同土地利用方式下土壤磷迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007,26(S): 141-145.
- [5] Pernet C B, Qi W X, Liu H J, et al. Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(10):5294-5301.
- [6] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009,323(5917):1014-1015.
- [7] 何毓蓉,郑霖,陈学华,等. 中国紫色土[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] 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.
- [9] 刘肃,李西开. Mehlich3 通用浸提剂的研究[J]. 土壤学报, 1995,32(2):132-141.
- [10] Bache B W, Williams E G. A phosphate sorption index for soils[J]. Journal of Soil Science, 1971,22(3):289-301.
- [11] 谢学俭,冉炜,沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究[J]. 土壤, 2003,35(6):506-509.
- [12] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007,44(1):37-47.
- [13] 王彦,张进忠,王珍华,等. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2011,20(10):2068-2074.
- [14] 高超,张桃林,吴蔚东,等. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 7(22): 68-72.
- [15] 李学平,石孝均,刘萍. 紫色土磷素流失的环境风险评估:土壤磷的“临界值”[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1153-1158.
- [16] 田娟,刘凌,董贵明,等. 淹水土壤磷释放机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008,39(2):426-430.
- [17] 刘建玲,廖文华,张作新,等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评估[J]. 中国农业科学, 2007,40(5):959-965.
- [18] 田春丽,介晓磊,刘世亮,等. 富啡酸对石灰性潮土中磷吸附—解吸及其对锌次级吸附—解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(3):530-537.

(上接第 38 页)

- [17] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展, 2006,21(8):849-856.
- [18] 刘刚才,张建辉,高美荣,等. 土壤水蚀影响因子与土壤退化研究进展[J]. 西南农业学报, 2003,16(S1):23-28.
- [19] 潘兴瑶,李法虎,刘洪禄. 土壤结皮及其对土壤水蚀影响的研究进展[C]//北京农业工程学会. 国际农业论谈:2005 北京都市农业工程科技创新与发展国际研讨会论文集. 2005.
- [20] 武文波,姬翠翠,李晓松,等. 影响土壤水蚀的环境因子分析[J]. 中国水土保持, 2010,31(5):36-38.
- [21] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000,20(4):27-30,45.